

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

**Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»**

С.М. Логвинков

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

«ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА»

для студентов по направлению подготовки – гражданская защита

Харьков 2016

УДК 331.45
ББК 65.247

Рецензент:

Березуцкий В.В. – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедры «Охрана труда и окружающей среды» НТУ «ХПИ»

Утверждено на заседании кафедры «Охрана труда и окружающей среды»
Национального технического университета «ХПИ»
(протокол № 12 от 09 марта 2016 г.)

Логвинков С.М.

Методические указания к практическим работам по дисциплине «Теория горения и взрыва» для студентов по направлению подготовки – гражданская защита / С.М. Логвинков / – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – 73 с.
(в электронном виде, формат PDF).

Представлены материалы для проведения практических занятий по учебной дисциплине «Теория горения и взрыва». Каждое занятие сопровождается необходимыми теоретическими сведениями, индивидуальными заданиями, примерами выполнения и методиками расчетов, вопросами для самодиагностики усвоенных знаний.

Рекомендовано для студентов направления подготовки «Инспектор охраны труда» и может быть полезно студентам других направлений подготовки, близких по профилю.

Рис.3. Табл.9. Бібліогр.23

**УДК 331.45
ББК 65.247**

© С.М. Логвинков, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. Исследование различных видов пламени и составление уравнений реакций горения веществ в воздухе	5
1.1. Теоретическая часть работы	5
1.2. Лабораторное оборудование и приборы	7
1.3. Порядок выполнения исследований	8
1.4. Вопросы для самодиагностики	9
Тема 2. Определение стехиометрической концентрации горючего вещества и составление материального баланса горения	10
2.1. Теоретическая часть работы	10
2.2. Методика расчетов	16
2.3. Вопросы для самодиагностики	21
Тема 3. Тепловой баланс реакций горения и определение температуры горения	22
3.1. Теоретическая часть работы	22
3.2. Практическая часть работы	27
3.3. Пример выполнения задания	27
3.4. Вопросы для самодиагностики	28
Тема 4. Расчет некоторых параметров взрывных превращений	29
4.1. Теоретическая часть работы	29
4.2. Индивидуальные расчетные задания	31
4.3. Пример выполнения первой части индивидуального расчетного задания	33
4.4. Пример выполнения второй части индивидуального расчетного задания	35
4.5. Вопросы для самодиагностики	36
Тема 5. Расчет концентрационных пределов распространения пламени	37
5.1. Теоретическая часть работы	37
5.2. Характеристика методов расчета	39
5.3. Индивидуальные расчетные задания	41
5.4. Методика расчетов	41
5.6. Вопросы для самодиагностики	42
Тема 6. Расчет температурных пределов распространения пламени	43
6.1. Теоретическая часть работы	43
6.2. Характеристика методов расчета	45
6.3. Индивидуальные расчетные задания	47
6.4. Методика расчетов	47

6.5. Пример выполнения индивидуального расчетного задания	47
6.6. Вопросы для самодиагностики	48
Тема 7. Расчет температуры вспышки	49
7.1. Теоретическая часть работы	49
7.2. Характеристика расчетных методов определения температуры вспышки	50
7.3. Индивидуальные расчетные задания	52
7.4. Методика расчетов	52
7.5. Пример выполнения индивидуального расчетного задания	53
7.6. Вопросы для самодиагностики	53
Тема 8. Расчет параметров горения паровоздушных смесей на открытом пространстве	54
8.1. Теоретическая часть работы	54
8.2. Индивидуальные расчетные задания	59
8.3. Методика расчетов	61
8.4. Пример выполнения индивидуального расчетного задания	61
8.5. Вопросы для самодиагностики	63
Тема 9. Расчет характерных параметров горения фонтанирующих горючих веществ	64
9.1. Теоретическая часть работы	64
9.2. Индивидуальные расчетные задания	66
9.3. Методика расчетов	66
9.4. Пример выполнения индивидуального расчетного задания	66
9.5. Вопросы для самодиагностики	67
Литература	69

ТЕМА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПЛАМЕНИ И СОСТАВЛЕНИЕ УРАВНЕНИЙ РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ ВЕЩЕСТВ В ВОЗДУХЕ

1.1. Теоретическая часть работы

Горение – сложный физико – химический процесс на основе быстропротекающих реакций окислительно – восстановительного типа, сопровождающихся интенсивным выделением тепла, продуктов взаимодействия и светового излучения.

Пламя – область пространства, заполненная газообразными веществами, в которой реализуются все диффузионные процессы подготовки горючей смеси к химическому взаимодействию и непосредственное горение.

При горении веществ на воздухе в ламинарном режиме пламя имеет характерное строение, в котором можно выделить несколько зон: подготовительную, горения, смешанную: из продуктов горения и воздуха, холодного воздуха. В каждой из зон протекают различные по характеру процессы, определяющие разницу температур пламени в зависимости от высоты точки замера. Имеются и характерные различия в цвете пламени при горении веществ различного типа.

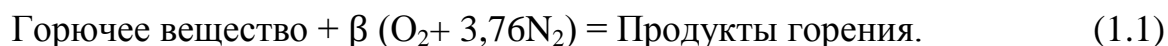
Спецификой окислительно – восстановительных реакций, выделяющей их из других видов химических взаимодействий, является перенос электронов от одного реагента (восстановителя) к другому (окислителю). Важным понятием для окислительно – восстановительных процессов является степень окисления, характеризующая состояние атома в молекуле и позволяющая количественно определить возможную глубину окисления атома в соединениях.

Составление уравнений окислительно – восстановительных реакций, лежащих в основе процесса горения, выполняют по химическим правилам, с соблюдением электронного баланса и учетом радикально – цепного механизма их реализации. Для удобства анализа реакций горения методика их составления предусматривает:

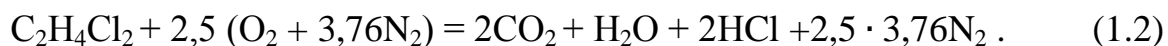
1. Уравнение реакции приводится к 1 молю горючего вещества путем деления стехиометрических коэффициентов на стехиометрический коэффициент у горючего компонента. Приведенное уравнение может содержать дробные стехиометрические коэффициенты.

2. В реакциях горения в среде воздуха сразу учитывают в уравнении его состав в молях, как $(O_2 + 3,76N_2)$. Мольный состав воздуха носит условный характер, следующий из примерного в нем содержания кислорода (21%) и азота с другими инертными газами (79 %). Это эквивалентно тому, что на 1 моль кислорода воздуха приходится $79 : 21 = 3,76$ молей азота.

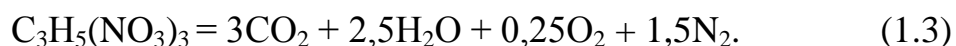
3. В реакциях горения веществ на воздухе в продуктах взаимодействия учитывают только химические соединения в высшей степени окисления, условно считая, что процесс идет до полного сгорания горючего вещества, а воздух имеется в необходимом стехиометрическом соотношении. Условное число молей воздуха, необходимое для полного сгорания, определяется стехиометрическим коэффициентом β :



4. Кроме продуктов полного окисления веществ (углерод – CO_2 , водород – H_2O , сера – SO_2 , фосфор – P_2O_5 , кремний – SiO_2 , металлы – высшие оксиды) в продуктах реакций горения могут учитываться галогеноводороды (HF , HCl , HBr , HJ), которые полагают образовавшимися в результате взаимодействия соответствующих галогенов (F , Cl , Br , J) с атомами водорода в составе горючего вещества. Например, реакция горения дихлорэтана ($C_2H_4Cl_2$) в воздушной среде описывается уравнением:



5. В молекулах горючих веществ может содержаться кислород и он выполняет роль внутреннего окислителя до полного сгорания. Наиболее характерно внутримолекулярное окисление для реакций горения взрывчатых и пиротехнических веществ, Например нитроглицерина ($C_3H_5(NO_3)_3$):



6. Уравнивание элементов в левой и правой частях реакций горения начинают с атомов углерода, затем серы, фосфора и кремния (металлов), галогенов, водорода. В последнюю очередь уравнивают количество атомов кислорода и азота. Коэффициент β можно рассчитать по формуле:

$$\beta = C + S + 0,25 (H - \text{Галоген}) - 0,5O + 1,25P, \quad (1.4)$$

где C, S, H, Галоген, O, P – число атомов соответствующих химических элементов.

1.2. Лабораторное оборудование и приборы

Изучение различных видов пламени и его зонального строения выполняется на лабораторной установке, объем которого приведен на рис. 1.

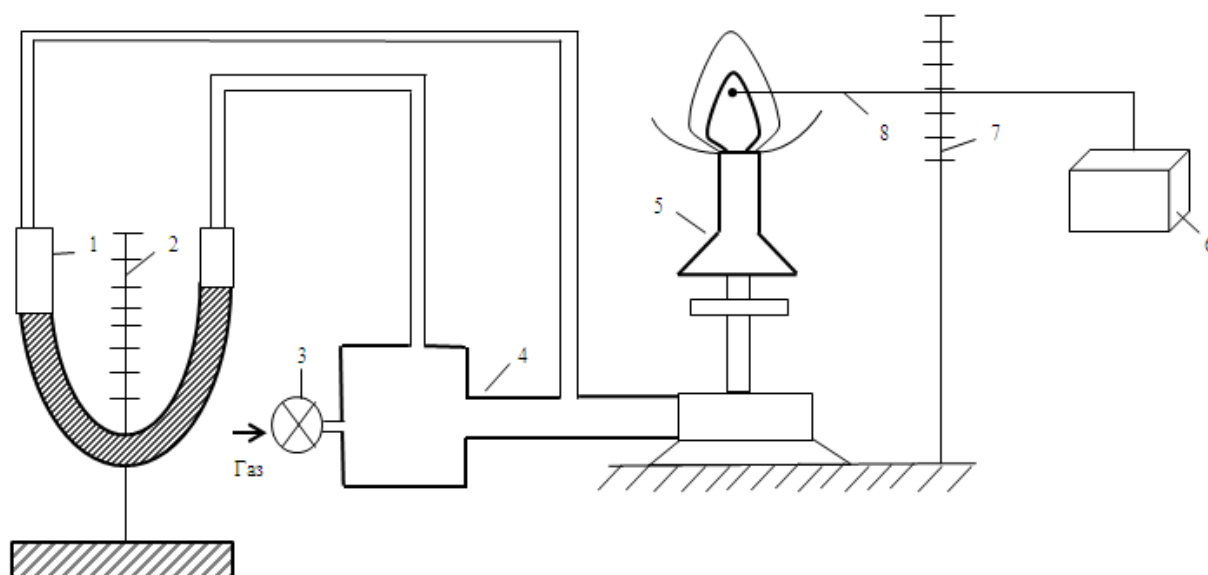


Рис. 1. Схема лабораторной установки

В состав лабораторной установки входят:

1. U – образный манометр для регистрации скорости подачи газа;
2. измерительная шкала разности уровней U – образного манометра;
3. кран магистрали подачи газа;
4. трубка Вентури, в которой имеются пропускные отверстия разного диаметра, что создает разницу давлений в зависимости от скорости потока газа;
5. газовая горелка;
6. милливольтметр, градуированный в $^{\circ}\text{C}$;
7. измерительная шкала высоты точки замера температуры в различных зонах пламени;
8. термопара, спай которой можно перемещать в пламени.

1.3. Порядок выполнения исследований

1.3.1. Включить подачу газа, зажечь горелку и установить подачу газа, характерную для визуального различения зон в строении пламени. Отметить форму и отличия цвета в различных зонах.

1.3.2. Ввести спай термопары в пламя на различной высоте и отметить температуры пламени по показателям милливольтметра.

1.3.3. Построить графическую зависимость изменений температуры от высоты точки замера в пламени.

1.3.4. Изменяя с помощью крана на газовой магистрали подачу газа к горелке, записывать показания водяного U – образного манометра и отмечать вид пламени. После окончания замеров, отключить подачу газа.

1.3.5. Выполнить расчеты скорости газа (ω_{Γ} , м/с) при различных значениях показаний манометра:

$$\omega_{\Gamma} = [(2g \cdot (\rho_{\text{в}} / \rho_{\Gamma}) \cdot \Delta H) / (1 - (d_1 / d_2)^4)]^{0,5}, \quad (1.5)$$

где $g = 9,8 \text{ м / с}^2$; $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг / м}^3$ – плотность воды ; $\rho_{\Gamma} = 0,7 \text{ кг / м}^3$ – плотность газа; d_1, d_2 – диаметры на входе и выходе трубки Вентури, м; ΔH – показания водяного манометра, м.

1.3.6. Рассчитать числа Рейнольдса и соотнести их с режимом течения. Расчет числа Рейнольдса (Re) выполняют по формуле:

$$\text{Re} = \frac{\omega_{\Gamma} \cdot d_0 \cdot \rho_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}}, \quad (1.6)$$

где d_0 – диаметр газовой горелки, м; μ_{Γ} – динамическая вязкость газа, кг / (м · с).

1.3.7. Составить таблицу результатов исследований режимов пламени в виде:

№	Показания манометра, ΔH , м	ω_{Γ} , м/с	Re	Режим пламени
1.				

1.4. Индивидуальные расчётные задания по составлению уравнений реакций горения индивидуальных веществ в среде воздуха выдаются преподавателем по вариантам: а) Углеводороды: 1а) метан, 2а) этан, 3а) пропан; б) Кислородсодержащие вещества: 1б) метиловый спирт, 2б) этиловый спирт, 3б) ацетон (C_3H_6O); в) Азотсодержащие вещества: диэтиламин ($C_4H_{11}N$); г) Фосфорсодержащие вещества: фосфин (PH_3); д) Серосодержащие вещества: тиофен (C_4H_4S); е) Галогенсодержащие вещества: 1е) дихлорэтан ($C_2H_4Cl_2$), 2е) трихлорэтан ($C_2H_3Cl_3$), 3е) хлорбромэтан (C_2H_4ClBr); ж) Элементоорганические вещества и сложные соединения: 1ж) фосфамид ($C_5H_{12}O_2PS_2N$), 2ж) тетраэтоксисилан ($(C_2H_5O)_4Si$), 3ж) триэтилсерофосфат ($C_6H_{15}O_3PS$).

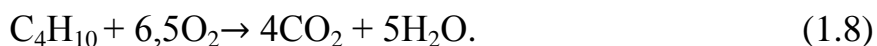
1.5. Пример выполнения задания по составлению реакций горения бутана:

Бутан (C_4H_{10}) в составе молекулы содержит углерод и водород, продуктами полного окисления которых являются CO_2 и H_2O . Соответственно, эти соединения должны находиться в правой части уравнений реакции горения.

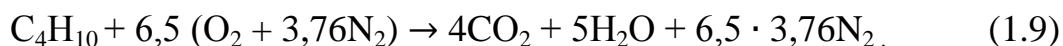
Составляем уравнение горения бутана в среде кислорода:



Записываем уравнение реакции (1.7) в приведенной к 1 молю горючего вещества форме:



Составляем уравнение реакции горения бутана в среде воздуха:



$$\beta = 6,5.$$

1.4. Вопросы для самодиагностики

1. Кратко сформулировать суть перекисной теории окисления и теории цепных реакций.
2. Дать определение физико – химической системы и горения.
3. Какие факторы определяют возможность развития химической реакции?

4. Дать классификационные отличия горения: гомогенного и гетерогенного, диффузного и кинетического, дефлаграционного и детонационного, ламинарного и турбулентного.
5. Дать определение пламени и пояснить структуру пламени.
6. От каких факторов зависит цвет пламени и температура в различных зонах диффузного пламени?
7. Какие процессы протекают в различных зонах пламени?
8. Назвать отличительный признак окислительно-восстановительных реакций.
9. Перечислить продукты полного сгорания индивидуальных веществ, учитываемых при составлении реакций горения.
10. Дать состав воздуха и особенности составления реакций горения в среде воздуха.

ТЕМА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ГОРЮЧЕГО ВЕЩЕСТВА И СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ГОРЕНИЯ

2.1. Теоретическая часть работы

Основу горения, как сложного физико-химического процесса, составляют окислительно-восстановительные реакции, а условия их реализации зависят от баланса между реагентами и продуктами взаимодействия. Горючая смесь, состав которой отвечает уравнению реакции горения, называется смесью стехиометрического состава. Такие смеси наиболее полно отвечают механизму взаимодействия, реакция протекает с максимальной скоростью и потому они наиболее легко воспламеняются и обеспечивают максимальное выделение тепла. Для практических целей необходимо прогнозировать огнеопасность веществ и рассчитывать оптимальные условия горения, при которых горючее вещество наиболее эффективно взаимодействует с окислителем. Концентрация горючего вещества, отвечающая его стехиометрическому соотношению в реакции горения, называется стехиометрической.

Объемная стехиометрическая концентрация горючего вещества ($\varphi_{\text{сгв}}$) может быть рассчитана по формулам:

$$\text{в смеси с кислородом } \varphi_{\text{сгв}} = 100 / (1 + \beta), \% , \quad (2.1)$$

$$\text{в смеси с воздухом } \varphi_{\text{сгв}} = 100 / (1 + 4,76 \beta), \% . \quad (2.2)$$

В формуле (2.2) учтен условный состав воздуха (79 % N_2 и 21 % O_2), что позволяет производить эквивалентную замену 1 моля кислорода в реакциях горения на воздушно – азотную смесь ($\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2$), в которой суммарно представлено $1 + 3,76 = 4,76$ молей газовой смеси.

Массовую стехиометрическую концентрацию горючего вещества ($\varphi'_{\text{сгв}}$) рассчитывают с учетом соответствующих значений объемной концентрации:

$$\varphi'_{\text{сгв}} = 10 \cdot \varphi_{\text{сгв}} \cdot M / V_{\text{м}} , \text{ г/м}^3, \quad (2.3)$$

где M – молярная масса вещества, кг / кмоль; $V_{\text{м}}$ – молярный объем газа при данной температуре, $\text{м}^3 / \text{кмоль}$.

Значение молярного объема газа при заданной температуре (T , К) и давлении (P , кПа) определяется по формуле:

$$V_{\text{м}} = 22,4 \cdot 101,3 \cdot T / 273 P, \text{ м}^3/\text{кмоль}. \quad (2.4)$$

Составление материального баланса выполняется с целью определения объема воздуха, необходимого для полного сгорания горючего вещества, а также объема образующихся продуктов горения. Для горения веществ в воздушной среде различают удельное и полное, теоретическое и действительное количество воздуха.

Удельное количество воздуха – количество воздуха, необходимое для сгорания единицы количества горючего вещества (1 моль, 1 кг, 1 м^3).

Полное количество воздуха – количество воздуха, необходимое для сгорания произвольного количества горючего вещества.

Теоретическое количество воздуха – минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания горючего вещества.

Действительное количество воздуха – количество воздуха, реально затраченное на сгорание горючего вещества при данных условиях.

Разность между действительным и теоретическим количеством воздуха называют избытком воздуха. Коэффициент избытка воздуха (α) характеризует степень обеспеченности реакции горения воздухом:

$$\alpha = V_B / V_B^0, \quad (2.5)$$

где V_B^0 – удельный теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания горючего вещества, $\text{м}^3 / \text{кг}$; V_B – удельный действительный объем воздуха, поступающий на горение, $\text{м}^3 / \text{кг}$.

Избыток воздуха (ΔV_B) не затрачивается на реализацию непосредственно химического взаимодействия и переходит в продукты сгорания:

$$\Delta V_B = V_B - V_B^0 = V_B^0 (\alpha - 1). \quad (2.6)$$

Продукты реакции горения могут быть представлены газообразными, твердыми и жидкими веществами, образующимися при реализации окислительно-восстановительных взаимодействий горючего вещества и окислителя. Состав горючего вещества и условий реакционного взаимодействия определяют состав продуктов сгорания, в которых могут содержаться инертные примеси исходной горючей смеси, избыток горючего или окислителя – результат нестехиометрии. Вся система веществ продуктов сгорания называется дымом. По физико-химической классификации дисперсных систем дым относят к дисперсиям, состоящим из твердых и жидких частиц дисперсной фазы, зависших в газовой дисперсионной среде.

Уравнение реакций горения индивидуальных веществ в воздухе в общем виде может записываться:

$$1 \text{ ГВ} + \beta (\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2) = \sum_{i=1}^l n_i \cdot \text{ПГ}_i \quad (2.7)$$

где ГВ – горючее вещество, n_i – количество молей вещества i – го вида (от $i = 1$ до l); ПГ_i – вещества i – го вида в продуктах горения.

Соответственно, из уравнений реакций горения типа (2.7) определяют теоретическое число молей воздуха (n_B^0), которое необходимо для полного сгорания 1 моля горючего вещества:

$$n_B^0 = \beta(1 + 3,76) = 4,76 \cdot \beta, \text{ моль / моль.} \quad (2.8)$$

Удельное теоретическое число молей продуктов сгорания ($n_{\text{ПГ}}^0$) по реакции (2.7) равно сумме молей всех веществ, входящих в состав продуктов горения:

$$n_{\text{ПГ}}^0 = \sum_{i=1}^B n_i. \quad (2.9)$$

В условиях горения вещества с избытком воздуха определяют удельное действительное число молей воздуха (n_B) и, соответственно, продуктов горения ($n_{\text{ПГ}}$):

$$n_B = \alpha \cdot n_B^0, \quad (2.10)$$

$$n_{\text{ПГ}} = n_{\text{ПГ}}^0 + (\alpha - 1) \cdot n_B^0. \quad (2.11)$$

Известные из реакции (2.7) числа молей веществ i – го вида продуктов горения ($n_{\text{ПГ}_i}$) и рассчитанное по (2.11) значение $n_{\text{ПГ}}$, - позволяют рассчитать процентный состав продуктов горения:

$$\% \text{ ПГ}_i = 100 \cdot n_{\text{ПГ}_i} / n_{\text{ПГ}}, \%. \quad (2.12)$$

При расчетах следует учесть, что горение с избытком воздуха обуславливает переход неучаствующих непосредственно в реакции горения компонентов воздуха в продукты сгорания, в которых будет отмечаться их избыток:

$$\% \text{ O}_2 = 100 (\alpha - 1) \beta / n_{\text{ПГ}}, \% \quad (2.13)$$

$$\% \text{ N}_2 = 100 \cdot \alpha \cdot 3,76 \cdot \beta / n_{\text{ПГ}}, \% . \quad (2.14)$$

При расчетах следует учитывать возможность нахождения горючего вещества в различном агрегатном состоянии, что требует перевода единиц измерения. Если горючее вещество в газообразном состоянии (горючий газ – ГГ), то на 1 кмоль ($V_M^{\text{ГВ}} = 22,4 \cdot 101,3 \cdot T / 273P$, м³/кмоль) расходуется теоретический объем воздуха ($n_B^0 \cdot V_M^{\text{Б}}$) м³ или действительный объем воздуха ($n_B \cdot V_M^{\text{Б}}$) м³. Условия соответствия можно записать:

$$\begin{array}{lcl}
1 \text{ кмоль ГГ} & \text{—————} & n_B^0 = 4,76 \cdot \beta, \text{ кмоль воздуха} \\
V_M^{\Gamma B} \text{ м}^3 \text{ ГГ} & \text{—————} & n_B^0 \cdot V_M^B = 4,76 \cdot \beta \cdot V_M^B, \text{ м}^3 \text{ воздуха} \\
1 \text{ м}^3 \text{ ГГ} & \text{—————} & V_B^0, \text{ м}^3 \text{ воздуха.}
\end{array}$$

Эти условия позволяют составлять пропорции, в частности, удельный теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания 1 м³ горючего газа:

$$V_B^0 = 4,76 \cdot \beta \cdot V_M^B / V_M^{\Gamma B}, \text{ м}^3 \quad (2.15)$$

Когда можно принять, что горючий газ и воздух находятся в одинаковых условиях, то $V_M^B = V_M^{\Gamma B}$ и на сгорание 1 м³ горючего газа будет расходоваться следующий удельный объем воздуха:

$$\text{теоретический: } V_B^0 = 4,76 \cdot \beta, \text{ м}^3 / \text{м}^3 \quad (2.16)$$

$$\text{действительный: } V_B = 4,76 \cdot \beta \cdot \alpha, \text{ м}^3 / \text{м}^3. \quad (2.17)$$

Аналогично можно составить пропорции для расчета объема продуктов сгорания горючего газа и при равенстве условий нахождения горючего газа и продуктов сгорания ($V_M^{\Gamma \Gamma} = V_M^{\Pi \Gamma}$):

$$\text{теоретический: } V_{\Pi \Gamma}^0 = \sum n_{\Pi \Gamma i}, \text{ м}^3 / \text{м}^3, \quad (2.18)$$

$$\text{действительный: } V_{\Pi \Gamma} = V_{\Pi \Gamma}^0 + (\alpha - 1) \cdot 4,76 \cdot \beta, \text{ м}^3 / \text{м}^3. \quad (2.19)$$

Полный объем воздуха и продуктов сгорания горючего газа конкретного объема определяют: объем горючего газа умножается на соответствующие значения V_B и $V_{\Pi \Gamma}$.

Тепловое расширение продуктов сгорания приводит к увеличению их объема. Объем продуктов сгорания при этом определяют согласно универсального газового закона:

$$V_{\Pi \Gamma}^K = V_{\Pi \Gamma}^H \cdot T^K \cdot P^H / T^H \cdot P^K, \quad (2.20)$$

где индексы «н» и «к» относятся к начальным и конечным значениям соответствующих параметров состояния.

Для горючих веществ в конденсированном виде (твердые, жидкие) перевод единиц размерности учитывает, что 1 кмоль соответствует молярной массе вещества (М, кг). Следовательно, на 1 кг горючего вещества удельные объемы воздуха и продуктов горения составляют:

$$\text{воздуха: теоретический: } V_B^0 = V_M^B \cdot 4,76 \beta / M, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (2.21)$$

$$\text{действительный: } V_B = \alpha \cdot V_M^B \cdot 4,76 \beta / M, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (2.22)$$

продуктов горения:

$$\text{теоретический: } V_{\text{пг}}^0 = (V_{\text{пг}}^M \cdot \sum n_{\text{пг}i}) / M, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.23)$$

$$\text{действительный: } V_{\text{пг}} = V_{\text{пг}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_B^0, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.24)$$

При горении определенного количества конденсированного горючего вещества вычисления соответствующих объемов необходимого воздуха и продуктов горения проводят путем перемножения их удельных значений на заданную массу горючего вещества.

Состав сложных горючих веществ выражают массовыми долями или процентным содержанием конкретных химических элементов. Для сложных горючих веществ, состоящих из водорода, углерода и серы, удельный теоретический объем воздуха рассчитывают по формуле:

$$V_B^0 = (4,76 \cdot V_M / (4 \cdot 100)) \cdot [\varphi_c / 3 + \varphi_H - (\varphi_O - \varphi_S) / 8] \approx 0,29 [\varphi_c / 3 + \varphi_H - (\varphi_O - \varphi_S) / 8], \quad \text{м}^3/\text{кг} \quad (2.25)$$

Объем продуктов сгорания сложного вещества рассчитывают с учетом аддитивного вклада каждого химического элемента в его составе:

$$V_{\text{пг}}^0 = \sum_{i=1}^n V_{\text{пг}i} \cdot g_i, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.26)$$

где $g_i = \varphi_i / 100$ – массовая доля i – го элемента в составе горючего вещества.

При нормальных условиях удельный расход продуктов сгорания некоторых элементов рассчитан заранее для упрощения расчетов (табл. 2.1)

Таблица 2.1.

Удельные объекты продуктов сгорания

Элементы горючего вещества	Удельный объем, м ³ / кг				
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂	P ₂ O ₅
С	1,87	-	7,00	-	-
Н	-	11,20	21,10	-	-
S	-	-	2,63	0,7	-
P	-	-	3,40	-	0,36
N	-	-	0,80	-	-
O	-	-	-2,63	-	-
H ₂ O (физическая влага)	-	1,24	-	-	-

2.2. Методика расчетов

2.2.1. Расчеты выполняют применительно к реакциям горения веществ (согласно индивидуальных заданий, выданных к работе №1) в среде воздуха. Температуру окружающей среды принять 20°C, атмосферное давление 100 кПа, коэффициент избытка воздуха 1,5.

2.2.2. Рассчитать по уравнению реакции горения объемную и массовую стехиометрические концентрации горючего вещества по формулам (2.2), (2.3).

2.2.3. Составить материальный баланс горения в форме (2.7) и определить удельное теоретическое число молей воздуха и продуктов сгорания по формулам (2.8), (2.9).

2.2.4. Определить с учетом коэффициента избытка воздуха действительные значения удельного теоретического числа молей воздуха и продуктов сгорания по уравнениям (2.10), (2.11).

2.2.5. Рассчитать состав продуктов горения по формулам (2.12) – (2.14).

2.2.6. Определить молярную массу вещества и молярный объем газа при данных условиях по формуле (2.4).

2.2.7. Определить теоретические объемы воздуха и продуктов горения по уравнениям (2.21), (2.23).

2.2.8. Определить действительные объемы воздуха и продуктов сгорания при заданных условиях по формулам (2.22), (2.24).

2.3. Методика расчета материального баланса горения сложного вещества.

2.3.1. По формуле (2.25) рассчитать удельный теоретический объем воздуха для полного сгорания сложного вещества с заданным элементным составом.

2.3.2. Определить действительный удельный объем воздуха с учетом коэффициента избытка (2.17).

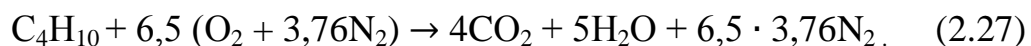
2.3.3. Определить удельный теоретический объем продуктов горения с учетом аддитивного вклада каждого элемента в состав сложного вещества (2.26), для облегчения расчетов воспользовавшись табл. 2.1.

2.3.4. Рассчитать полный действительный объем продуктов горения с учетом коэффициента избытка воздуха по уравнению (2.24).

2.3.5. Определить действительный объем продуктов горения при данных условиях по формуле (2.20).

2.4. Пример расчета материального баланса горения индивидуального горючего вещества.

2.4.1. Уравнение реакции горения бутана в среде воздуха ранее уже составлено (1.9):



2.4.2. Рассчитываем объемную и массовую стехиометрические концентрации горючего вещества:

$$\varphi_{\text{сгв}} = 100 / (1 + 4,76 \cdot 6,5) = 3,13 \%, \quad (2.28)$$

$$\varphi'_{\text{сгв}} = 10 \cdot 3,13 \cdot 58 / 24,35 = 74,55, \text{ г/м}^3, \quad (2.29)$$

где множитель 58 – молекулярная масса бутана: $M = 4 \cdot 12 + 10 \cdot 1 = 58$ (кг/кмоль), множитель 24,35 – молярный объем бутана при данных условиях (2.4): $V_m = 22,4 \cdot 101,3 \cdot 293 / 273 \cdot 100 = 24,35 \text{ (м}^3\text{/кмоль)}$.

2.4.3. Определяем удельное теоретическое число молей воздуха и продуктов горения (2.8), (2.9):

$$n_o^B = \beta (1 + 3,76) = 6,5 \cdot 4,76 = 30,94 \text{ моль / моль}, \quad (2.30)$$

$$n_{\text{пр}}^0 = 4 + 5 + 6,5 \cdot 3,76 = 33,44 \text{ моль / моль}. \quad (2.31)$$

2.4.4. Учитываем коэффициент избытка воздуха и по формулам (2.10), (2.11) определяем действительные значения удельного числа молей воздуха и продуктов горения:

$$n_B = 30,94 \cdot 1,5 = 46,41 \text{ моль / моль}, \quad (2.32)$$

$$n_{\text{пр}} = 33,44 + (1,5 - 1) \cdot 30,94 = 48,91 \text{ моль / моль}. \quad (2.33)$$

2.4.5. Рассчитываем состав продуктов горения:

$$\text{CO}_2 = 4 \cdot 100 / 48,91 = 8,18 (\%) \quad (2.34)$$

$$\text{H}_2\text{O} = 5 \cdot 100 / 48,91 = 10,22 (\%) \quad (2.35)$$

$$\text{O}_2 = 100 \cdot (1,5 - 1) \cdot 6,5 / 48,91 = 6,64 (\%) \quad (2.36)$$

$$\text{N}_2 = 100 \cdot 1,5 \cdot 3,76 \cdot 6,5 / 48,91 = 74,96 (\%). \quad (2.37)$$

2.4.6. Определяем удельные теоретические объемы воздуха и продуктов горения (M и V_m определены ранее в п. 2.4.2) по формулам (2.21), (2.23):

$$V_B^0 = 24,35 \cdot 4,76 \cdot 6,5 / 58 = 12,99 \text{ м}^3 / \text{кг}, \quad (2.38)$$

$$V_{\text{пр}}^0 = 24,35 (4 + 5 + 6,5 \cdot 3,76) / 58 = 14,04 \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (2.39)$$

2.4.7. Определяем действительные удельные значения объема воздуха и продуктов горения бутана в воздушной среде (2.22), (2.24):

$$V_B = 12,99 \cdot 1,5 = 19,49 \text{ м}^3 / \text{кг} \quad (2.40)$$

$$V_B = 14,04 + (1,5 - 1) \cdot 12,99 = 20,54 \text{ м}^3 / \text{кг}. \quad (2.41)$$

2.4.8. Обобщаем результаты расчетов и делаем выводы: а) Наиболее огнеопасную смесь: бутан – воздух следует ожидать для стехиометрической концентрации бутана 3,13 (% объема) или 74,55 г/м³; б) для полного сгорания 1 кг бутана теоретически необходимо 12,99 м³ воздуха, а теоретический объем продуктов сгорания составит 14,04 м³; в) действительный объем воздуха на 1 кг при заданном коэффициенте избытка составит 19,49 м³, а объем продуктов

сгорания $20,54 \text{ м}^3$; г) в продуктах сгорания будут содержаться CO_2 , H_2O , O_2 и N_2 – в количестве (%): 8,18, 10,22, 6,64 и 74,96, соответственно.

2.5. Контрольные задачи и пример решения по составлению материального баланса горения сложных веществ.

2.5.1. Варианты контрольных задач соответствуют списочному номеру студента в группе (табл. 2.2) или выдаются преподавателем индивидуально.

2.5.2. Условиями задачи определено, что горит твердое горючее вещество в количестве 7 кг. Начальные параметры окружающей среды, температура горения и коэффициент избытка воздуха заданы. Горючее вещество имеет известный элементный состав, а требуется определить удельные и полные объемы воздуха, продуктов сгорания и содержание водяного пара в дыме.

2.5.3. Согласно уравнения (2.25) определяем удельный теоретический объем воздуха (вариант 25):

$$V_{\text{в}}^0 = (4,76 \cdot 22,4 / 4 \cdot 100) \cdot (55 / 3 + 10 - (20 - 4,5) / 8) = 7,04 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.42)$$

2.5.4. Действительный расход воздуха с учетом коэффициента избытка составит:

$$V_{\text{в}} = 7,04 \cdot 1,5 = 10,56 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.43)$$

Таблица 2.2

Условия контрольных задач

Вариант	Содержание элементов и влаги в веществе. %					$T^{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	$T^{\text{г}}, ^\circ\text{C}$	$P^{\text{к}}, \text{кПа}$	α
	С	Н	О	S	H_2O				
1	57	5	29	2,5	6,5	10	900	95	1,3
2	59	6	28	1,0	6,0	15	950	100	1,8
3	55	7	29	2,5	6,5	15	950	100	1,8
4	55	7	29	2,5	6,5	20	800	90	1,5
5	57	4	28	3,0	8,0	18	950	95	1,8
6	57	6	26	1,0	10,0	25	850	100	1,5
7	55	10	25	1,5	8,5	20	850	95	1,3
8	55	10	20	4,5	10,5	20	850	95	1,3
9	55	10	20	4,5	10,5	15	800	100	1,5

Продолжение табл. 2.2.

Вариант	Содержание элементов и влаги в веществе. %					T ^н , °C	T ^г , °C	P ^к , кПа	α
	C	H	O	S	H ₂ O				
10	56	9	20	4,5	10,5	15	800	100	1,5
11	57	8	20	4,5	10,5	15	800	100	1,5
12	58	7	20	4,5	10,5	15	800	100	1,5
13	54	11	20	4,5	10,5	15	800	100	1,5
14	53	12	20	4,5	10,5	15	800	100	1,5
15	52	13	20	4,5	10,5	15	800	100	1,5
16	55	10	24	0,5	10,5	15	800	100	1,5
17	55	10	23	1,5	10,5	15	800	100	1,5
18	55	10	22	2,5	10,5	15	800	100	1,5
19	55	10	21	3,5	10,5	15	800	100	1,5
20	55	10	20	4,5	10,5	15	1000	100	1,9
21	55	10	20	4,5	10,5	15	950	90	1,9
22	55	10	20	4,5	10,5	15	900	80	1,9
23	55	10	20	4,5	10,5	15	850	70	1,9
24	55	10	20	4,5	10,5	15	900	90	1,9
25	55	10	20	4,5	10,5	15	900	90	1,5

2.5.5. Определяем полный действительный расход воздуха на сгорание 7 кг сложного вещества:

$$V_B = 10,56 \cdot 7 = 73,92 \text{ м}^3. \quad (2.44)$$

2.5.6. Составляем таблицу удельных объемов продуктов горения элементов, с учетом их содержания (мас. доли) в составе сложного вещества.

Элементы горючих веществ и их массовая доля в составе		Объем продуктов сгорания, м ³ / кг			
		CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂
C	0,55	1,87 · 0,55	-	-	7,00 · 0,55
H	0,10	-	11,2 · 0,10	-	21,10 · 0,10
S	0,045	-	-	0,7 · 0,045	2,63 · 0,045
O	0,20	-	-	-	-2,63 · 0,20
W (влага)	0,105	-	1,24 · 0,105	-	-
Всего	1,000	1,0285	1,2502	0,0315	5,55235

2.5.7. Суммируя итоговые значения объемов продуктов сгорания в составленной таблице, получаем удельный теоретический объем продуктов сгорания сложного вещества:

$$V_{\text{пт}}^0 = 1,03 + 1,25 + 0,03 + 5,55 = 7,86 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.45)$$

2.5.8. Рассчитываем удельный и полный действительные объемы продуктов горения с учетом заданного коэффициента избытка воздуха и количества сгорающего вещества:

$$V_{\text{пт}} = 7,86 + (1,5 - 1) \cdot 10,56 = 8,33 \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.46)$$

$$V_{\text{пт}} = 8,33 \cdot 7 = 58,31 \text{ м}^3. \quad (2.47)$$

2.5.9. Рассчитываем объем продуктов горения при заданных условиях окружающей среды и температуры горения:

$$V_{\text{пт}}^{\text{к}} = 58,31 \cdot (900 + 273) \cdot 101,3 / (15 + 273) \cdot 90 = 267,31 \text{ м}^3 \quad (2.48)$$

2.5.10. Определяем содержание влаги (паров воды) в продуктах горения (дыме):

$$\varphi_{\text{H}_2\text{O}} = 1,2502 \cdot 100 / 8,33 = 15,01 \text{ (\%)}. \quad (2.49)$$

2.5.11. Обобщаем результаты решения контрольной задачи и делаем вывод, что сгорание 7 кг твердого горючего вещества сложного состава потребует 73,92 м³ воздуха и будет сопровождаться образованием 267,31 м³ газообразных продуктов горения, содержащих 15,01 % водяного пара.

2.3. Вопросы для самодиагностики

1. Пояснить понятие материальный баланс реакции горения.
2. Почему стехиометрическая концентрация горючего вещества характеризует реакцию горения?
3. Изложить суть полного и неполного сгорания веществ.
4. Назвать различия полного и неполного сгорания веществ, находящихся в различном агрегатном состоянии.
5. Коэффициент избытка воздуха и особенности его учета при горении веществ в различном агрегатном состоянии.

6. Дать определение продуктам горения и охарактеризовать соединения в их составе.
7. Указать отличия при расчете продуктов полного и неполного сгорания.
8. Назовите составляющие компоненты дыма и укажите их токсичность.
9. Как взаимосвязаны исходные параметры окружающей среды с параметрами горения?
10. Охарактеризуйте влияние продуктов горения сложных веществ на окружающую среду.

ТЕМА 3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС РЕАКЦИЙ ГОРЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

3.1. Теоретическая часть работы

В отличие от материального баланса, в основе которого закон сохранения массы, тепловой баланс базируется на законе сохранения энергии, в частности, тепловой. Тепловой баланс позволяет определять ряд энергетических характеристик горения и его основных параметров. Применяемые методы расчетов заимствованы из соответствующих разделов термохимии и термодинамики изолированных систем. Для реакций горения имеются особенности расчетов, т.к. они протекают с выделением тепла (экзотермические), а энтальпия реакции (тепловой эффект) является, по сути, теплотой сгорания. Теплота сгорания может быть выражена в различных единицах измерения в зависимости от способа выражения количества вещества, в результате сгорания которого она выделена (молекулярная, кДж / моль; массовая кДж / кг; объемная кДж / м³). Различают высшую и низшую теплоту сгорания вещества. Высшая (Q_v) рассчитывается из условия, что в продуктах горения вода находится в жидком агрегатном состоянии (учитывается теплота конденсации). Для низшей теплоты сгорания (Q_n) расчёты ведут при допущении нахождения воды в продуктах сгорания в газообразном виде, в форме пара.

Теплота сгорания отождествляется с энтальпийным эффектом реакции горения и в связи с тем, что такая реакция всегда экзотермична, знак «-» не учитывают. Молярная теплота сгорания рассчитывается на основе справочных термодинамических данных как разность между изменениями энтальпий образования из элементов всех продуктов реакции и изменениями энтальпий образования из элементов всех исходных компонентов с учетом соответствующих стехиометрических коэффициентов. В связи с тем, что изменение энтальпии образования из элементов для индивидуальных веществ равно нулю (для азота и кислорода, в частности), а стехиометрический коэффициент у горючего вещества в реакциях горения приводят к единице, то согласно закону Гесса:

$$Q_{\text{гор}} = \left| \Delta H_{\text{гор}}^0 \right| = \left| \sum_{i=1}^l (\Delta H_{\text{пг}i}^0 \cdot n_{\text{пг}i}) - \Delta H_{\text{гв}}^0 \right|, \text{ кДж / моль}, \quad (3.1)$$

где $\Delta H_{\text{гв}}^0, \Delta H_{\text{пг}i}^0$ – стандартные значения изменения энтальпий образования из элементов соединения горючего вещества и соединений продуктов реакции в газообразном состоянии, кДж / моль; $n_{\text{пг}i}$ – стехиометрические коэффициенты (число молей) i – тых продуктов горения.

Для пересчета молярной теплоты сгорания в массовую ($Q'_{\text{гор}}$) и объемную ($Q''_{\text{гор}}$) теплоты сгорания применяют формулы:

$$Q'_{\text{гор}} = Q_{\text{гор}} \cdot 1000 / M, \text{ кДж / кг}, \quad (3.2)$$

$$Q''_{\text{гор}} = Q_{\text{гор}} \cdot 1000 / V_{\text{м}}, \text{ кДж / м}^3. \quad (3.3)$$

Для сложных веществ с известным элементным составом можно определить молярные теплоты сгорания каждого из элементов, выразить их в форме массовых теплот сгорания по формуле (3.3) и с учетом долевого аддитивного вклада в веществе составить общую расчетную формулу для теплоты сгорания. Такой подход применен для составления формулы Менделеева, в которой также учтено отличие $Q'_{\text{в}}$ от $Q'_{\text{н}}$ на значение теплоты конденсации ($Q'_{\text{конд}}$) пара воды в составе продуктов горения:

$$Q'_{\text{н}} = Q'_{\text{в}} - Q'_{\text{конд}}, \text{ кДж / кг}. \quad (3.4)$$

$$Q'_B = 339,4 C + 1257 P + 108,9 (S - O - N) - 25,1 (9H + W), \text{ кДж / моль},$$

где C, H, O, N, S, W – процентное содержание углерода, водорода, кислорода, азота, серы и влаги в сложном веществе.

Сравнивать эффективность сгорания различных видов горючих веществ можно по теплоте сгорания, которая позволяет также соотнести тепловую энергию с другими видами энергии. С этой целью в практику введено понятие единица условного топлива, за которую принята теплота сгорания 7000 ккал / кг (1 ккал = 4,184 Дж). При сопоставлении теплоты сгорания с другими источниками энергии удобно пользоваться переводными коэффициентами (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Энергетические эквиваленты

Вид энергии	Размерность	Коэффициент перевода				
		электро- энергия	тепловая энергия	механическая энергия	условное топливо	нормаль- ный пар
Электроэнергия	кВт · ч	1	860	1,36	0,123	1,344
Механическая энергия	лс · ч	0,735	632,3	1	$90,4 \cdot 10^{-3}$	0,989
Условное топливо	кг	8,141	7000	11,06	1	10,13
Нормальный пар	кг	0,744	640	1,011	$91,5 \cdot 10^{-3}$	1

Примечание: размерность механической энергии указана в лошадиных силах (лс) и является устаревшей, но традиционно применяется в характеристиках двигателей внутреннего сгорания.

В зоне горения выделяется тепловая энергия, которая расходуется на предварительный нагрев горючего вещества и продуктов горения, а также на тепловые потери в окружающую среду. Температура, до которой нагреваются продукты горения, названа температурой горения и она взаимосвязана с расходом тепла на нагрев продуктов горения ($Q_{\text{пг}}$):

$$Q_{\text{пг}} = V_{\text{пг}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{гор}} - T_o), \text{ кДж / м}^3, \quad (3.6)$$

где $V_{\text{пр}}$ – объем продуктов горения, м^3 ; c_p – удельная объемная теплоемкость продуктов горения $\text{кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{К})$; T_0 – начальная температура горючей смеси, К ; T_k – температура горения, К .

Из (3.6) температура горения может быть выражена в виде:

$$T_{\text{гор}} = Q_{\text{пр}} / (c_p \cdot V_{\text{пр}}) + T_0, \text{ К} . \quad (3.7)$$

Выделяемое в реакции тепло, расходуемое на нагрев продуктов горения, зависит от условий протекания реакции горения. В зависимости от различий в условиях реализации процесса горения различают калориметрическую, теоретическую, адиабатическую и действительную температуру горения.

Калориметрическая температура горения характеризует нагрев продуктов горения при условиях:

- все тепло реакции горения расходуется на нагрев продуктов горения ($Q_n = Q_{\text{пр}}$);
- реализуется полное сгорание горючей смеси стехиометрического состава ($\alpha = 1$);
- в продуктах горения не происходит их термической диссоциации;
- начальные условия заданы $T_0 = 273 \text{ К}$, $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$.

Теоретическая температура горения начинает отличаться от калориметрической температуры выше 1700°C , когда теплотериями в окружающую среду пренебрегают, но учитывают расход энергии на процессы диссоциации соединений в продуктах горения:



Адиабатическая температура горения имеет отличия от калориметрической в условиях: горит смесь, состав которой отличается от стехиометрического и горение может проходить с избытком или недостатком воздуха. Другие условия аналогичны: 273 К и $101,3 \text{ кПа}$ параметры горючей смеси в начальный момент, тепло потерями в окружающую среду можно пренебречь, вся тепловая энергия реакции горения затрачивается на нагрев продуктов горения.

Действительная температура определяется реальными параметрами процесса, по значению всегда меньше адиабатической и близка калориметрической. Экспериментальное определение действительной температуры горения сопряжено с рядом сложностей и часто ограничиваются расчетом адиабатической температуры на основе закона сохранения энергии и химического состава горючего вещества. При этом используют или термодинамические методы расчета с учетом температурной зависимости теплоемкостей соединений в реакции горения, или метод линейной интерполяции по справочным данным изменений энтальпии продуктов горения. Второй из отмеченных методов менее точен, но проще для выполнения расчетов и предполагает ряд этапов расчета:

- по составленному уравнению реакции горения определяют число молей продуктов горения ($n_{\text{пг}}$) с учетом заданного коэффициента избытка воздуха;
- определяют низшую теплоту сгорания $Q_{\text{н}}$ (см. работы №1 и №2);
- рассчитывают среднюю энтальпию продуктов горения ($\Delta H_{\text{ср}}$):

$$\Delta H_{\text{ср}} = Q_{\text{н}} / n_{\text{пг}} ; \quad (3.10)$$

- в справочных данных для изменения энтальпии азота по значению $\Delta H_{\text{ср}}$ в первом приближении определяют температуру горения (T_1);

- определяют энтальпию продуктов горения при T_1 :

$$\Delta H_{\text{пг } 1} = \sum (\Delta H_{\text{пг } i} \cdot n_{\text{пг } i}), \text{ кДж / моль}; \quad (3.11)$$

- определяют значение температуры горения во втором приближении (T_0). принимая ее значение больше, чем T_1 (при $\Delta H_{\text{пг } 1} < Q_{\text{н}}$) или меньше T_1 (при $\Delta H_{\text{пг } 1} > Q_{\text{н}}$);

- определяют энтальпию продуктов горения при T_2 по уравнению (3.11), но при изменившемся значении температуры;

- рассчитывают температуру горения методом линейной интерполяции:

$$T_{\text{ад}} = T_1 + (T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{н}} - \Delta H_{\text{пг } 1}) / (\Delta H_{\text{пг } 2} - \Delta H_{\text{пг } 1}), \text{ К} \quad (3.12)$$

3.2. Практическая часть работы

3.2.1. Индивидуальные задания выполняются для горючих веществ, которые заданы при выполнении работы №1.

3.2.2. Согласно заданию требуется определить высшую и низшую молярную, массовую и объемную теплоту сгорания горючего веществ в среде кислорода. Начальные условия горения – нормальные. Рассчитать массовую теплоту сгорания по формуле Менделеева и оценить погрешность.

3.3. Пример выполнения задания

3.3.1. Реакция горения бутана в среде кислорода составлена в работе №1:



3.3.2. По справочным термодинамическим данным находим энтальпии образования веществ, участвующих в реакции (3.13) при нормальных условиях:

$$\Delta H_{\text{CO}_2} = - 393,78 \text{ кДж / моль}; \Delta H_{\text{H}_2\text{O (пар)}} = - 241,84 \text{ кДж / моль};$$

$$\Delta H_{\text{H}_2\text{O (ж)}} = - 285,84 \text{ кДж / моль}; \Delta H_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = -135,00 \text{ кДж / моль}.$$

3.3.3. По закону Гесса определяем молярную высшую и низшую теплоты сгорания бутана по реакции (3.13):

$$Q_{\text{в}} = |4 \cdot (- 393,78) + 5 \cdot (- 285,84) - (- 135,00)| = 2869,32 \text{ кДж / моль}, \quad (3.14)$$

$$Q_{\text{н}} = |4 \cdot (- 393,78) + 5 \cdot (- 241,84) - (- 135,00)| = 2649,32 \text{ кДж / моль}, \quad (3.15)$$

3.3.4. Молярная масса и молярный объем бутана при нормальных условиях определены в работе №2 п. 2.4.2:

$$M = 58 \text{ кг / кмоль}, V_{\text{м}} = 24,35 \text{ м}^3 / \text{кмоль}.$$

3.3.5. Выполняем пересчет $Q_{\text{в}}$ и $Q_{\text{н}}$ из молярных единиц измерения в массовые:

$$Q'_{\text{в}} = 2869,32 \cdot 1000 / 58 = 49471,03 \text{ кДж / кг}, \quad (3.16)$$

$$Q'_{\text{н}} = 2649,32 \cdot 1000 / 58 = 45677,93 \text{ кДж / кг}. \quad (3.17)$$

3.3.6. Пересчитываем молярную теплоту сгорания в объемную:

$$Q''_{\text{в}} = 2869,32 \cdot 1000 / 22,4 = 128094,64 \text{ кДж / м}^3, \quad (3.18)$$

$$Q''_{\text{н}} = 2649,32 \cdot 1000 / 22,4 = 118273,21 \text{ кДж / м}^3. \quad (3.19)$$

3.3.7. Обобщаем результаты: при заданных условиях горения бутана в кислороде достигаются теплоты сгорания:

а) молярная $Q_v = 2869,32$ кДж / моль, $Q_n = 2649,32$ кДж / моль;

б) массовая $Q'_v = 49471,03$ кДж / кг, $Q'_n = 45677,93$ кДж / кг;

в) объемная $Q''_v = 12809,64$ кДж / м³, $Q''_n = 118273,21$ кДж / м³.

3.3.8. Определяем массовое содержание элементов в молекуле бутана, чтобы иметь возможность применить формулу Менделеева:

$$\% C = 4 \cdot 12 \cdot 100 / 58 = 82,76 \%, \quad (3.20)$$

$$\% H = 1 \cdot 10 \cdot 100 / 58 = 17,24 \%. \quad (3.21)$$

3.3.9. Определяем низшую массовую теплоту сгорания бутана по формуле Менделеева (3.5):

$$Q'_n = 339,4 \cdot 82,76 + 1257 \cdot 17,24 - 25,1 (9 \cdot 17,24 - 0) = 45864,9 \text{ кДж/кг.} \quad (3.22)$$

3.3.10. Сравниваем результаты расчетов Q'_n по (3.22) и (3.17) и определяем погрешность (Δ):

$$\Delta = (45864,9 - 45677,93) \cdot 100 / 45864,9 = 0,41 \% \quad (3.23)$$

3.3.11. Делаем вывод по результатам выполнения индивидуального задания: а) значения теплоты горения бутана в кислороде определены для Q_v и Q_n в различных единицах измерения, удобных для практического применения (п.3.3.7); б) применение формулы Менделеева для расчета Q'_n вполне обосновано, т.к. значение погрешности очень мало ($< 1\%$).

3.4. Вопросы для самодиагностики

1. Почему тепловой баланс для сложных систем выполняется после составления материального баланса?

2. На каком законе основывается составление теплового баланса реакций горения?

3. В чем суть закона Гесса и с какой целью его применяют при составлении теплового баланса?

4. Назовите и охарактеризуйте виды теплоты сгорания.

5. С какой целью применяют различные размерности теплоты сгорания?

6. Какой подход применялся при выводе формулы Менделеева для расчета теплоты сгорания сложных веществ?
7. Дайте определение понятию единица условного топлива.
8. В чем различие калориметрической и теоретической температуры горения?
9. В чем различие адиабатической и действительной температуры горения с калориметрической?
10. Какими методами расчетов можно определить температуру адиабатического горения?

ТЕМА 4. РАСЧЕТ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

4.1. Теоретическая часть работы

Взрыв – процесс, характеризующийся скачкообразным изменением скорости превращений в составе и структуре сложной системы при достижении параметрами состояния критических значений. Взрывные превращения наблюдаются в различных условиях и для многих видов веществ, материалов и изделий.

Характерным примером физических взрывов является потеря механической прочности сосудов, работающих под давлением. При инициирующем воздействии (удар, местный нагрев, превышение рабочего давления и др.) потенциальная энергия сжатой среды (газа) в течение малого промежутка времени переходит в кинетическую энергию движущихся осколков разрушенного сосуда. Работа (А) истечения газа из закрытого объема при допущении отсутствия изменений температуры, правомерном из – за высокой скорости процесса (адиабатный режим), определяется по формуле:

$$A = K \cdot P_1 \cdot V [1 - (P_2 / P_1)^{\frac{k-1}{k}}] / (K - 1), \quad (4.1)$$

где P_1 , P_2 – давление внутри сосуда и в окружающей среде; V – объем сосуда с газом; K – показатель адиабаты, определяемый отношением

теплоемкостей газа при постоянном давлении (c_p) и при постоянном объеме (c_v): $K = c_p / c_v$.

Мощность физического взрыва определяется по отношению механической работы (A) к времени, за которое она произведена.

При конструировании баллонов для сжатых газов руководствуются расчетом предельно допустимых давлений $[P]$:

$$[P] = 2 \cdot (S - C) \cdot \sigma \cdot \varphi / (D + S - C), \quad (4.2)$$

Для сосудов со сжиженными газами существует значительный риск их взрыва из – за плохой сжимаемости жидкостей по сравнению с газами и возникновения значительных напряжений в стенках, обусловленных стремлением к испарению в условиях градиента температуры (ΔT) внутри и снаружи сосуда. При этом риск возрастает при значительной разнице в термических коэффициентах объемного расширения (α) и сжатия (β) сжиженных газов разного вида. Возникающее давление может оцениваться по уравнению:

$$P = (\alpha / \beta) \cdot \Delta T, \text{ кг / см}^2, \quad (4.3)$$

где ΔT – градиент температур, °C.

Для снижения риска физического взрыва таких сосудов их объем заполняют не полностью. Необходимый свободный объем (V_c) обычно около 10 %, но может быть рассчитан более точно:

$$V_c = \alpha \cdot V \cdot \Delta T. \quad (4.4)$$

Взрывное горение происходит очень быстро и в его основе не только физические, но в большей мере химические превращения. В таких процессах можно полагать, что образовавшиеся газы не успели расшириться, т.е. рассматривать процесс в адиабатно – изохорном приближении – без теплотерь в окружающую среду и при постоянном объеме. В этом случае энергию взрыва ($Q_{\text{взр}}$) можно считать изменением внутренней энергии системы и она может быть рассчитана по формуле:

$$Q_{\text{взр}} = Q_n + R \cdot \Delta T \cdot \Delta n, \text{ кДж / моль}, \quad (4.5)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $8,31441 \cdot 10^{-3}$ кДж / (моль · К); Q_n – нижняя теплота сгорания горючего вещества, кДж / моль; T_o – температура в начале взрывного горения, К; Δn – изменение числа молей продуктов горения и исходной горючей смеси.

Для адиабатно – изохорного режима давление при взрыве ($P_{взр}$) можно рассчитать по уравнению:

$$P_{взр} = (P_o \cdot T_{взр} \cdot \sum n_{пгi}) / (T_o \cdot \sum n_{пгi}), \text{ кПа}, \quad (4.6)$$

где P_o, T_o – начальные давление и температура горючей смеси (кПа, К, соответственно); $T_{взр}$ – температура взрыва; $\sum n_{пгi}$, $\sum n_{гci}$ – суммарное число молей продуктов горения и горючей исходной смеси из i – компонентов.

При расчете $P_{взр}$ температура взрыва определяется как действительная температура реакции горения (см. работу №3).

4.2. Индивидуальные расчетные задания

4.2.1. Расчетные задания состоят из двух частей: 1. Определить необходимый свободный объем баллона для его безопасной эксплуатации, а также возможную мощность физического взрыва, если объем его составляет $V(л)$, он заполнен сжиженным газом (х), температурные пределы эксплуатации баллона от t_o до t_1 °С. Давление газа в баллоне полагать заданным по показаниям манометра на нем (P), а время физического взрыва принять равным τ . 2. Определить энергию и давление при взрывном горении в среде кислорода горючего вещества (согласно задания в работе №1) в стехиометрической концентрации.

4.2.2. Выбор варианта для выполнения первой части задания осуществляется согласно номеру, совпадающего со списочным номером студента в группе.

4.2.3. Варианты для выполнения первой части индивидуальных заданий обобщены в таблице 4.

Таблица 4.1.

Варианты заданий

Вариант	V, л	t ₀ , °C	t ₁ , °C	P, мПа	τ, с	х
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1	5	0	25	2	0,001	Аммиак
2	6	1	26	4	0,002	Аммиак
3	8	2	27	6	0,003	Аммиак
4	10	3	28	8	0,001	Аммиак
5	12	4	29	10	0,002	Сероводород
6	20	5	30	12	0,003	Сероводород
7	30	6	31	14	0,001	Сероводород
8	40	7	32	15	0,002	Диоксид углерода
9	50	8	33	2	0,003	Диоксид углерода
10	5	9	34	4	0,001	Хлор
11	6	10	35	6	0,002	Хлор
12	8	0	36	8	0,003	Хлор
13	10	1	37	10	0,001	Хлор
14	12	2	38	12	0,002	Аммиак
15	20	3	39	14	0,003	Аммиак
16	30	4	40	15	0,001	Диоксид углерода
17	40	5	25	2	0,002	Диоксид углерода
18	50	6	26	4	0,003	Сероводород
19	5	7	27	6	0,001	Сероводород
20	6	8	28	8	0,002	Диоксид углерода
21	8	9	29	10	0,003	Диоксид углерода
22	10	10	30	12	0,001	Диоксид углерода
23	12	0	31	14	0,002	Хлор
24	20	1	32	15	0,003	Хлор
25	30	5	35	10	0,001	Хлор

4.3. Пример выполнения первой части индивидуального расчетного задания

4.3.1. Для расчета V_c будем применять формулу (4.4), а мощность при физическом взрыве полностью заполненного сосуда определим путем деления значения работы истечения газа из сосуда (4.1) на заданное время взрывного превращения. Для примера выбран вариант №25.

4.3.2. Необходимые справочные данные сведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2.

Необходимые справочные данные

х	C_p , Дж / моль· К	C_v , Дж / моль· К	Температура, °С	$\beta \cdot 10^6$	$\alpha \cdot 10^6$
Аммиак	0,536	0,408	-30	-	180
			0	111	204
			+30	158	257
Сероводород	0,245	0,183	-30	-	160
			0	118	175
			+30	158	206
Диоксид углерода	0,245	0,188	-30	-	-
			0	824	568
			+30	11592	724
Хлор	0,124	0,091	-30	-	158
			0	130	187
			+30	200	226

4.3.3. Определяем методом экстраполяции значения α при предельных температурах эксплуатации и его среднее значение в заданном температурном интервале:

$$\alpha_5 = \frac{(226-187) \cdot 10^{-6}}{30} \cdot 5 + 187 \cdot 10^{-6} = 193,5 \cdot 10^{-6}, \quad (4.7)$$

$$\alpha_{35} = \frac{(226-187) \cdot 10^{-6}}{30} \cdot 35 + 226 \cdot 10^{-6} = 271,5 \cdot 10^{-6}, \quad (4.8)$$

$$\alpha_{cp} = (193,5 \cdot 10^{-6} + 271,5 \cdot 10^{-6}) / 2 = 232,5 \cdot 10^{-6}. \quad (4.9)$$

4.3.4. Определяем свободный объем в сосуде, необходимый для безопасного хранения сжиженного хлора:

$$V_c = 232,5 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot (35 - 5) = 0,21 \text{ (л)}. \quad (4.10)$$

Значение необходимого свободного объема составляет 0,7% от общего объема сосуда и достаточно для безопасного хранения сжиженного хлора.

4.3.5. При полном заполнении сосуда сжиженным хлором и резком колебании температур в пределах граничных значений, - может возникнуть давление (4.3):

$$\beta_5 = \frac{(200-130) \cdot 10^{-6}}{30} \cdot 5 + 130 \cdot 10^{-6} = 141,7 \cdot 10^{-6}, \quad (4.11)$$

$$\beta_{35} = \frac{(200-130) \cdot 10^{-6}}{30} \cdot 35 + 200 \cdot 10^{-6} = 281,7 \cdot 10^{-6}, \quad (4.12)$$

$$\beta_{cp} = (141,7 + 281,7) \cdot 10^{-6} / 2 = 211,7 \cdot 10^{-6}. \quad (4.13)$$

$$P = (232,5 \cdot 10^{-6} / 211,7 \cdot 10^{-6}) \cdot (35 - 5) = 33,4 \text{ (МПа)}. \quad (4.14)$$

Возникающее давление может превысить предел прочности на двухосевой разрыв некоторых конструкционных материалов.

4.3.6. Определим работу истечения газообразного хлора при адиабатическом расширении в результате физического взрыва сосуда, предварительно рассчитав значение коэффициента К для формулы (4.1). Этот коэффициент часто обозначают «j» и называют коэффициентом Пуассона:

$$K = C_p / C_v = 0,124 / 0,091 = 1,36, \quad (4.15)$$

$$A = (1,36 \cdot 10 \cdot 30 / 0,36) \cdot [1 - (0,1 / 10)^{\frac{0,36}{1,36}}] \cdot 10^3 = 1133 \cdot [1 - (0,01)^{0,26}] \cdot 10^3 \approx \\ \approx 2790840, \text{ Дж}. \quad (4.16)$$

Полученное значение имеет размерность [Дж] (т.к. объем подставлялся в размерности [л = 10⁻³ м³, а давление – в размерности [МПа = 10⁶], то учтен множитель 10³, учитывающий 1 Па = 1 Н / м², 1 Дж = 1 Н · м).

Значение мощности взрыва (1 Вт = Дж / с):

$$2790840 / 0,001 = 279084, \text{ кВт}. \quad (4.17)$$

4.4. Пример выполнения второй части индивидуального расчетного задания

4.4.1. Реакция горения для заданного газа составлена в работе №1:



4.4.2. Используя значения ранее определенной нижней теплоты сгорания бутана в реакции (4.18): $Q_{\text{н}} = 2649,32$ кДж / моль (см. п. 3.3.7 работы №3), определяем энергию взрыва по формуле (4.5):

$$Q_{\text{взр}} = 2649,32 + 8,31441 \cdot 10^{-3} \cdot 278 \cdot (4+5 - 6,5 - 1) = 2652,8 \text{ кДж / моль}. \quad (4.19)$$

4.4.3. В связи с тем, что взрывается горючая смесь в стехиометрической концентрации реакции (4.18), температура взрыва может быть определена по уравнению (3.7, работа №3) с применением рассчитанного значения энергии взрыва:

$$T_{\text{взр}} = 2652,8 \cdot 10^3 / (4 + 5) \cdot 97,324 + 298,15 = 3028,60 + 298,15 = 3326,75 \text{ (K)}. \quad (4.20)$$

4.4.4. В расчете (4.20) использовалось справочное значение средней теплоемкости бутана ($97,324$ Дж / моль · К), а полученное значение температуры взрыва указывает, что оно превышает температуры плавления многих огнеупорных соединений (например, температура плавления Al_2O_3 (корунд) – 2315 К, MgO (периклаз) – 3098 К).

4.4.5. Рассчитываем давление при взрыве бутана в среде кислорода по формуле:

$$P_{\text{взр}} = 0,1 \cdot 3326,75 \cdot (4 + 5) / [298,15 \cdot (1 + 6,5)] = 1,34 \text{ (МПа)}. \quad (4.21)$$

4.4.6. Делаем вывод по результатам расчетов: 1. Для безопасной эксплуатации сосуда для хранения сжиженного хлора требуется оставлять незаполненным объем не менее 0,7 % от общего объема сосуда, в противном случае может развиваться высокое давление (до $33,4$ МПа), способное нарушить конструкционную целостность сосуда и влекущее за собой его взрыв с большой мощностью (279084 кВт). 2. При взрывном горении бутана в среде кислорода и с заданными условиями – температура взрыва ($3326,75$ К)

превышает температуры плавления многих огнеупорных соединений, а давление при взрыве выше атмосферного в 13 раз (1,34 МПа).

4.5. Вопросы для самодиагностики

1. Дайте определение взрыва и отметьте особенности взрывного горения.
2. Какими причинами обусловлен риск взрыва сосудов, полностью заполненных сжиженными газами?
3. С какой целью оставляют свободным объем сосуда при заполнении сжиженным газом?
4. По какой формуле оценить значение возникающего давления в сосуде со сжиженным газом при резком перепаде температур?
5. Поясните смысл величин, входящих в формулу для определения работы по истечению сжатого газа из герметичного сосуда (4.1).
6. С какой целью определяют предельно допустимые значения давления для сосудов и как они зависят от толщины стенки и внутреннего диаметра сосуда?
7. Какое допущение позволяет рассчитывать энергию взрывного горения по формуле (4.5)?
8. Почему в формуле (4.5) учитывается полное изменение числа молей реакции горения, развивающегося во взрывном режиме?
9. Почему в формуле (4.5) учитывают низшую теплоту сгорания?
10. Следствием какого закона является формула (4.6) для расчета давления взрыва в адиабатно – изохорном приближении к реакции горения?

ТЕМА 5. РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПРЕДЕЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

5.1. Теоретическая часть работы

Горение возникает в результате самоускорения сложного физико-химического процесса со скачкообразным переходом от медленной к быстрой скорости взаимодействия. В горючей смеси из окислителя и горючего вещества в достаточной концентрации горение начинается после действия теплового импульса достаточной мощности – искра, разогретые стенки сосуда, адиабатическое сжатие или внутренние экзотермические процессы.

При высоких температурах в горючей смеси возрастает скорость движения молекул и частота эффективных столкновений, что обуславливает повышение скорости химического взаимодействия, тепловыделения и температуры реакционной системы. Возникающая разность температур изменяет и теплоотдачу от реакционной системы в окружающую среду за счет конвекции. При определенной температуре интенсивность тепловыделения и теплоотдачи сравниваются, а дальнейшее повышение скорости химического взаимодействия будет способствовать самонагреванию реакционной системы, создавая условия для самоускорения и начала горения.

Если в реакционной системе есть тепловыделение и условия для накопления тепла, то самонагревание может через время индукции обусловить самовозгорание. Самовоспламенение по сути процессов не отличается от самовозгорания, но происходит за счет разогрева от внешних источников тепла, чаще от горячих стенок сосуда с горючей смесью. Самовоспламенение происходит во всем объеме реакционной системы одновременно. В случае действия на реакционную систему мощного источника энергии (тепловой, чаще всего) с температурой выше, чем температура самонагрева, температура горючей смеси очень интенсивно возрастает в локальной области и происходит вынужденное зажигание.

Отмеченные виды возникновения горения имеют общие черты:

- необходима температура выше критической;
- интенсивность тепловыделения должна превышать интенсивность теплоотдачи в окружающую среду;
- от начала автоускорения процесса до начала горения есть промежуток времени – время индукции, в течение которого происходят подготовительные процессы.

Горючей средой считается та, которая способна продолжать горение после устранения источника зажигания. Однако, возникновение и распространение горения в смесях окислителя и горючего вещества возможны лишь в определенном диапазоне их концентраций. За пределом такого диапазона горение или не возникает или затухает после удаления источника зажигания. Различают: нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПРП, φ_n) – наименьшая концентрация горючего вещества с окислителем (воздухом), при которой уже возможно возникновение и распространение горения; верхний концентрационный предел распространения пламени (ВКПРП, φ_v) – наибольшая концентрация горючего вещества в смеси с окислителем (воздухом), при которой еще возможно возникновение и распространение горения. Концентрационный диапазон от φ_n до φ_v характеризуется возможностью зажигания и стойкого горения горючей смеси и называется областью взрывоопасных концентраций (ВОК). Если концентрация горючего вещества ниже НКПРП, то никакого горения возникать не может, горючая смесь слишком «бедная». При превышении концентрации горючего вещества значения ВКПРП возможность горения сохраняется при выходе горючей смеси из объема реакционного пространства и за счет поступления окислителя из окружающей среды. Поэтому в самом начале концентрационной шкалы находится область безопасных концентраций (БК), а в самом верху – область пожароопасных концентраций (ПОК). Значения φ_n и φ_v не являются строго постоянными, т.к. зависят от параметров внешней среды, следовательно, для практики важно определять отклонения этих величин,

гарантированно определяющие безопасные концентрации ($\varphi_{нб}$, $\varphi_{вб}$), ниже или выше которых горючая смесь не будет способна гореть. Поэтому, на концентрационной шкале между $\varphi_{н}$ и $\varphi_{нб}$, а также между $\varphi_{в}$ и $\varphi_{вб}$ (рис. 5.1) выделяют области опасных концентраций (ОК).

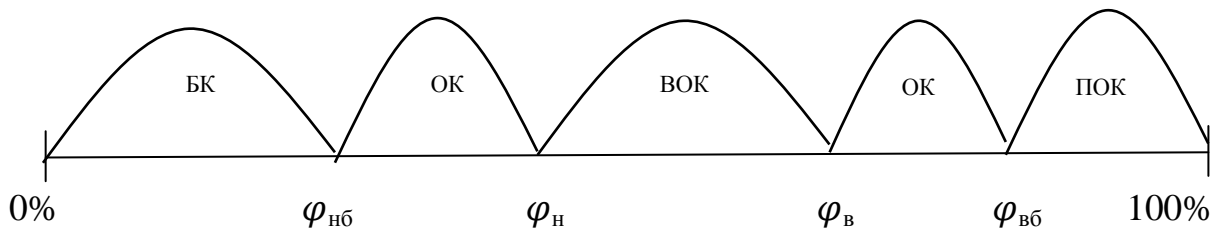


Рис. 5.1. Шкала концентраций горючего вещества в горючей смеси и ее деление на условные области.

5.2. Характеристика методов расчета

Концентрационные пределы распространения пламени могут отображаться объемными концентрациями (%) или массовыми концентрациями (г/м³).

Для расчета НКПП может использоваться значение нижней теплоты сгорания горючего вещества ($Q_{н}''$) и эмпирическая закономерность горения бедных смесей большинства углеводородов – критическое значение выделяемого тепла ($Q_{кр}''$) не превышает 1830 кДж / м³. В этом случае может быть составлена пропорция:

$$Q_{н}'' - 100\%$$

$$Q_{кр}'' - \varphi_{н}, \%$$

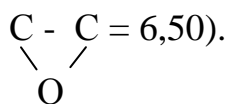
Решение пропорции в отношении $\varphi_{н}$ дает выражение:

$$\varphi_{н} = 100 \cdot Q_{кр}'' / Q_{н}'' = 183000 / Q_{н}'', \% \quad (5.1)$$

Элементный состав горючего вещества также позволяет определить НКПП:

$$\varphi_{н} = 100 / [1 + h_{\phi} \cdot \Delta H_{\phi}^0 + \sum_{i=1}^n (h_i m_i) + \sum_{j=1}^k (h_j m_j)] \%, \quad (5.2)$$

где h_{ϕ} - параметр теплоты образования газообразного горючего вещества, моль / кДж; ΔH_{ϕ}° - стандартная теплота образования горючего вещества, кДж / моль; h_i - параметр i - го элемента в молекуле горючего вещества; m_i - число атомов i - го вещества в молекуле горючего вещества; h_j - параметр кратных связей j - го элемента в молекуле горючего вещества; m_j - количество кратных связей (циклов) j - ых элементов в горючем вещества. Для большинства углеводородов значения отмеченных параметров: $h_{\phi} = 0,0246$; h_i (для элементов: C = 9,134; H = 2,612; O = -0,522; N = - 0,494; Cl = - 3,57); h_j (для кратной связи :C \equiv C = 7,88; для цикла



Этот расчет трудоемкий и не отличается точностью получаемых значений из – за применения усредненных значений параметров.

Для определения НКПРП и ВКПРП чаще применяют простой метод по эмпирической формуле:

$$\varphi_{н(в)} = 100 / (a \cdot \beta + b), \% \quad (5.3)$$

где β – стехиометрический коэффициент реакции горения; a , b – константы (для НКПРП: $a = 8,684$; $b = 4,769$; для ВКПРП: при $\beta \leq 7,5$ $a = 1,55$; $b = 0,56$; при $\beta > 7,5$ $a = 0,768$; $b = 6,554$).

Расчет безопасных концентраций выполняют по эмпирическим формулам:

$$\varphi_{н(б)} = 0,9 (\varphi_{н} - 0,21), \% \quad (5.4)$$

$$\varphi_{в(б)} = 1,1 (\varphi_{в} + 0,42), \%. \quad (5.5)$$

Уравнение (5.1) – (5.5) позволяют определить предельные концентрации для нормальных условий и воздушной среды. Отличие параметров окружающей среды от нормальных или обогащение воздуха кислородом обуславливает необходимость корректировки значений $\varphi_{н}$ и $\varphi_{в}$ по специальным методикам. Если горючее вещество не является индивидуальным химическим соединением, то для смешанных веществ НКПРП и ВКПРП рассчитывают с применением аддитивной формулы Ле – Шателье:

$$\varphi_{н(в)} = \sum \varphi_i / \sum (\varphi_i / \varphi_{н(в)i}) , \% , \quad (5.6)$$

где $\varphi_{н(в)i}$ – НКПРП или ВКПРП i – го компонента смеси, %, φ_i – содержание i – го компонента в смеси, %.

5.3. Индивидуальные расчетные задания

Для горючих веществ, заданных условиями практической работы №1, определить различными методами расчетов значения нижнего и верхнего концентрационных пределов распространения пламени, а также безопасные концентрации горючего вещества в воздушной среде при нормальных условиях.

5.4. Методика расчетов

5.4.1. По ранее определенному (3.19) значению низшей объемной теплоте сгорания паров заданного горючего вещества (Q_n'') и формуле (5.1) рассчитываем значение φ_n при нормальных условиях.

5.4.2. Стехиометрический коэффициент реакции горения заданного горючего вещества на воздухе (2.27) позволяет рассчитать φ_n и φ_v по формуле (5.3) в единицах объемной концентрации (%), а затем перевести в единицы массовой концентрации по формуле:

$$\varphi' = 10 \cdot \varphi_{н(в)} \cdot \frac{\mu}{V_\mu} , \text{ г / м}^3 , \quad (5.7)$$

где μ – молекулярная масса горючего вещества, V_μ – молекулярный объем горючего вещества.

5.4.3. Определяем предельные значения безопасных концентраций горючего вещества в воздушной среде при нормальных условиях по формулам (5.4), (5.5) и делаем вывод по результатам расчетов.

5.5. Пример выполнения индивидуального расчетного задания.

5.5.1. Для паров бутана низшая объемная теплота сгорания на воздухе (Q_n'') определена (3.19): 118273,21 кДж / м³ и можно применить формулу (5.1) для расчета НКПРП:

$$\varphi_n = 183000 / 118273,21 = 1,55 (\%) \quad (5.8)$$

5.5.2. Стехиометрический коэффициент реакции горения паров бутана на воздухе $\beta = 6,5$, согласно (2.27), что позволяет воспользоваться формулой (5.3):

$$\varphi_{\text{н}} = 100 / (8,684 \cdot 6,5 + 4,769) = 1,63 (\%), \quad (5.9)$$

$$\varphi_{\text{в}} = 100 / (1,55 \cdot 6,5 + 0,56) = 9,40 (\%). \quad (5.10)$$

Переводим объемные концентрации в массовые, применяя формулу (5.7) и значения $\mu = 58 \text{ кг / кмоль}$, $V_{\mu} = 24,35 \text{ м}^3 / \text{кмоль}$, (согласно п. 2.4.2 работы №2):

$$\varphi'_{\text{н}} = 10 \cdot 1,63 \cdot 58 / 24,35 = 38,83 (\text{г / м}^3), \quad (5.11)$$

$$\varphi'_{\text{в}} = 10 \cdot 9,40 \cdot 58 / 24,35 = 223,90 (\text{г / м}^3), \quad (5.12)$$

5.5.3. Руководствуясь минимальным значением $\varphi_{\text{н}}$ по различным методам расчетов (в частности, $\varphi_{\text{н}} = 1,55\%$ по (5.8)) и максимальным значением $\varphi_{\text{в}} = 9,40\%$ по (5.10), определяем безопасные концентрации по (5.4) и (5.5):

$$\varphi_{\text{нб}} = 0,9 \cdot (1,55 - 0,21) = 1,21 (\%), \quad (5.13)$$

$$\varphi_{\text{вб}} = 1,1 \cdot (9,40 + 0,42) = 10,80 (\%). \quad (5.14)$$

5.5.4. Переводим объемные концентрации в единицы массовой концентрации по формуле (5.7):

$$\varphi'_{\text{нб}} = 10 \cdot 1,21 \cdot 58 / 24,35 = 28,82 (\text{г / м}^3), \quad (5.15)$$

$$\varphi'_{\text{вб}} = 10 \cdot 10,8 \cdot 58 / 24,35 = 257,25 (\text{г / м}^3). \quad (5.16)$$

5.5.5. По результатам расчетов делаем вывод, что пары бутана в диапазоне концентраций от 1,63 до 9,40% (или 38,83 и 223,90 г / м³, соответственно) при смешении с воздухом при нормальных условиях взрывоопасны. Гарантированно безопасны концентрации бутана менее 1,21% (28,82 г / м³) и выше 10,80% (257,25 г / м³). Выше верхнего концентрационного предела сохраняется вероятность пожароопасности в случае истечения паров бутана из реакционного объема в результате дополнительного участия окислителя и уменьшения концентрации до взрывопожарного диапазона.

5.6. Вопросы для самодиагностики

1. Охарактеризуйте виды возникновения горения.
2. Какие общие черты существуют в различных видах возникновения горения?

3. Какими причинами обусловлено наличие времени индукции зажигания?
4. Дайте определение понятию горючей среды.
5. Какое значение концентрации горючего вещества считают нижним концентрационным пределом распространения пламени?
6. Какие обстоятельства определяют необходимость установления безопасных концентраций горючего вещества в воздухе?
7. Отметьте на шкале концентраций область взрывоопасных и пожароопасных концентраций горючего вещества.
8. На каком принципе основан метод определения φ_n по значению нижней теплоты сгорания горючего вещества на воздухе?
9. Представьте выражение для расчета φ_n и φ_v через стехиометрический коэффициент реакции горения горючего вещества на воздухе.

ТЕМА 6. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРЕДЕЛОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ

6.1. Теоретическая часть работы

Конденсированные горючие вещества (жидкие, твердые) характеризуются способностью к испарению. Именно газообразная фаза горючего конденсированного вещества (пары) и способна к горению. Скорость испарения тем выше, чем больше температура таких веществ. Поэтому при определенных температурах горючих жидкостей над их поверхностью концентрации паров могут достигать значения, отвечающие нижнему или верхнему концентрационному пределу распространения пламени. Соответственно, характерные значения концентраций паров можно соотнести с температурой горючей жидкости. Определение температуры жидкости существенно проще реализовать на практике, чем определение концентрации ее паров в смеси с воздухом или другим газообразным окислителем. По отмеченной причине использовать значения температурных пределов

распространения пламени более рационально для оценки взрывопожарной опасности.

Совмещенная температурно-концентрационная шкала (рис. 6.1) полностью соответствует шкале концентрации (рис. 5.1), где каждому значению концентраций отвечает температура с аналогичным индексом обозначений и сохранностью обозначений деления шкалы на условные области ($t_{пл}, t_{кип}$ – температура плавления и кипения горючего вещества, соответственно).

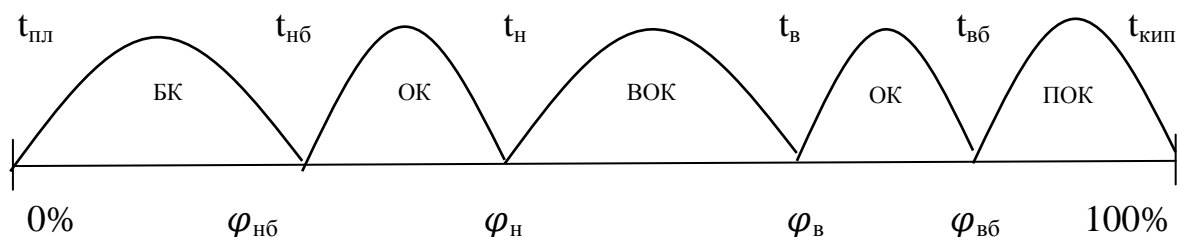


Рис.6.1. Совмещенная шкала температур – концентраций горючего вещества.

Значения температурных пределов распространения пламени позволяют сравнивать между собой пажоровзрывоопасность различных горючих жидкостей, устанавливать эксплуатационные диапазоны температур технологического оборудования, риск воспламенения паров в емкостях при определенной температуре. Определения терминов температурных пределов формируются аналогично по отношению к концентрационным пределам распространения пламени. Например, температурными пределами распространения пламени (нижним, верхним) называют температуры жидкого горючего вещества, при которых образуется насыщенный пар над его поверхностью с нижнем (верхним) концентрационным пределом распространения пламени. Температурные пределы зависят от различных факторов (параметров среды, энергии источника зажигания, вида окислителя, примесей инертных веществ в твердом, жидком и газообразном виде). Поэтому, как и для концентрационных пределов, определяют безопасные значения температурных пределов.

6.2. Характеристика методов расчета

Наличие в справочной литературе [] констант уравнения Антуана (устанавливает зависимость температуры горючей жидкости ($t_{гж}$) от давления насыщенных паров ($P_{нп}$)) позволяет преобразовать и использовать его для определения $t_{н(в)}$:

$$t_{гж} = [B / (A - \lg P_{нп})] - C_a ; \quad (6.1)$$

$$\text{или } t_{н(в)} = [B / (A - \lg (0,01 \cdot P_{общ} \cdot \varphi_{н(в)}))] - C_a, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.2)$$

где A , B , C_a – константы Антуана; $P_{общ}$ – общее давление газообразной среды в сосуде с горючей жидкостью, кПа; $\varphi_{н(в)}$ – концентрационные пределы распространения пламени, %.

Если в предварительных лабораторных экспериментах определена зависимость давления насыщенных паров от температуры горючей жидкости, то $t_{н(в)}$ можно определить методом линейной интерполяции:

$$t_{н(в)} = t_1 + (t_2 - t_1) (P_{нп(н(в))} - P_1) / (P_2 - P_1), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.3)$$

где $P_{нп(н(в))}$ – давление насыщенного пара, соответствующее нижнему или верхнему КППП, кПа; t_1 , t_2 – температуры, соответствующие давлению насыщенного пара P_1 и P_2 , $^\circ\text{C}$.

С учетом структурой химической формулы горючего вещества, состоящего из элементов С, Н, О, N значения $t_{н(в)}$ можно определять по эмпирической формуле:

$$t_{н(в)} = a_0 + a_1 \cdot t_{кип} + \sum a_j \cdot J_j, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.4)$$

где для t_n значение $a_0 = - 62,40 \text{ } ^\circ\text{C}$, $a_1 = 0,655$; для t_v значение $a_0 = - 41,43 \text{ } ^\circ\text{C}$, $a_1 = 0,723$; J_j – количество структурных групп j – го типа в формуле горючего вещества; $t_{кип}$ – температура кипения вещества, $^\circ\text{C}$; a_j – коэффициенты, выбираемые из табл. 6.1. в зависимости от типа структурной группы:

Таблица 6.1.

Значение коэффициентов a_j

Тип структурной группы	$a_j, ^\circ\text{C}$	
	для $t_{\text{н}}$	для $t_{\text{в}}$
C - C	- 0,909	- 1,158
C – H	- 0,009	+ 0,570
C = C	- 2,660	- 4,640
C – O	+ 0,110	+ 1,267
C = O	+ 5,570	+ 5,580
C - N	- 2,140	+ 0,096
N - H	+ 6,530	+ 6,152
O - H	+ 19,750	+ 17,800
C ÷ C (ароматическая связь)	- 0,733	- 0,767

Закономерности в строении и свойствах углеводородных соединений в гомологических рядах позволяют использовать другую эмпирическую формулу:

$$t_{\text{н(в)}} = K \cdot t_{\text{кип}} - 1, ^\circ\text{C}, \quad (6.5)$$

где K , l – эмпирические коэффициенты гомологических рядов горючих жидкостей, приводимые в справочной литературе[].

Значения безопасных температурных пределов рассчитывают по формулам:

$$t_{\text{нб}} = 0,9 \cdot (t_{\text{н}} - K_6), ^\circ\text{C}, \quad (6.6)$$

$$t_{\text{вб}} = 1,1 \cdot (t_{\text{в}} + K_6), ^\circ\text{C}, \quad (6.7)$$

где K_6 – коэффициент безопасности: для индивидуальных горючих веществ его значение составляет $10,5 ^\circ\text{C}$; для смесей: $14 ^\circ\text{C}$.

Для смесей горючих веществ, составляющих бинарные неazeотропные растворы, расчет $t_{\text{н(в)}}$ проводят по аппроксимационной формуле:

$$T_{\text{смн(в)}} = T_A - (T_A - T_B) \cdot (g_B)^{1/3}, \text{ K}, \quad (6.8)$$

где $T_{\text{смн(в)}}$ – нижний или верхний температурный предел распространения пламени горючей бинарной смеси, K; T_A , T_B – соответствующие нижние или верхние температурные пределы распространения пламени для компонента A и

В бинарной смеси, K ; g_B – массовая доля компонента В в смеси (компонентом В выбирается тот компонент, который обладает меньшим значением температурных пределов распространения пламени).

6.3. Индивидуальные расчетные задания

Для горючих веществ, заданных условиями практической работы №1, определить значения нижнего и верхнего температурных пределов распространения пламени, а также безопасные температуры эксплуатации горючего вещества. Для упрощения принять температуры кипения всех веществ 59 °С.

6.4. Методика расчетов

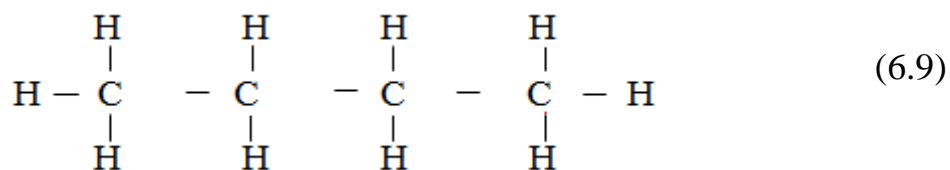
6.4.1. Студент самостоятельно выбирает метод для расчета $t_{н(в)}$, руководствуясь рациональностью применения формул (6.1) – (6.5) по характеристике различных методов (п. 6.2).

6.4.2. По выбранной формуле рассчитываются значения t_n и t_v .

6.4.3. По формулам (6.6), (6.7) определяют значения безопасных температур эксплуатации горючего вещества и делают вывод об опасных временах года для данного вещества.

6.5. Пример выполнения индивидуального расчетного задания

6.5.1. Для заданного горючего вещества – бутана известно его химическое строение, отображаемое структурной формулой:



Поэтому рациональным методом расчета $t_{н(в)}$ полагаем расчет по формуле (6.4).

6.5.2. По формуле (6.9) определяем количество структурных групп J_j :
 $J_{C-C} = 3$, $J_{C-H} = 10$.

6.5.3. По табл. 6.1 выбираем значения коэффициентов a_j : для группы С - С: $a_{jH} = - 0,909$, $a_{jB} = - 1,158$; для структурной группы С – Н: $a_{jH} = - 0,009$, $a_{jB} = + 0,570$.

6.5.4. По формуле (6.4) определяем значение t_H и t_B :

$$t_H = - 62,40 + 0,655 \cdot 59 + 3 \cdot (- 0,909) + 10 \cdot (- 0,009) = - 27,57 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$
 (6.10)

$$t_B = - 41,43 + 0,723 \cdot 59 + 3 \cdot (- 1,158) + 10 \cdot (- 0,57) = + 3,45 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$
 (6.11)

6.5.5. Определяем безопасные значения температур по формулам (6.6), (6.7):

$$t_{H0} = 0,9 \cdot (- 27,57 - 10,5) = - 34,3 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$
 (6.12)

$$t_{B0} = 1,1 \cdot (3,45 + 10,5) = + 15,3 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$
 (6.13)

6.5.6. Формулируем вывод: наиболее пожаровзрывоопасный температурный диапазон для бутана от $- 27,57 \text{ }^\circ\text{C}$ до $+ 3,45 \text{ }^\circ\text{C}$; безопасные температуры эксплуатации бутана находятся ниже $- 34,3 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше $+ 15,3 \text{ }^\circ\text{C}$, что возможно только в летний сезон времени.

6.5.7. Расчет условный, так как принята температура кипения отличающаяся от реальной (для н – бутана: $- 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$), что дает значительную погрешность. Реальный диапазон взрывопожарной опасности бутана от $- 65,5 \text{ }^\circ\text{C}$ до $- 39,6 \text{ }^\circ\text{C}$, то есть температурный диапазон очень сильных зимних морозов.

6.6. Вопросы для самодиагностики

1. Приведите примеры конденсированных горючих веществ.
2. Какое явление обуславливает горение конденсированных веществ?
3. Как влияет температура на процесс испарения конденсированных веществ?
4. В чем различие испарения горючих жидкостей, находящихся в закрытых и открытых сосудах?
5. Почему для оценки взрывопожароопасности горючих жидкостей чаще применяют значения температурных, а не концентрационных пределов распространения пламени?

6. Какие причины обуславливают возможность сопоставления значений температурных и концентрационных пределов распространения пламени?
7. Дайте определение нижнему и верхнему температурным пределам распространения пламени.
8. Почему для практического применения горючих жидкостей важно знать безопасные температурные пределы распространения пламени?
9. Перечислите основные методы расчета t_n и t_v .
10. Какие показатели определяют возможность расчета безопасных температур эксплуатации горючих жидкостей?

ТЕМА 7. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШКИ

7.1. Теоретическая часть работы

Температура вспышки относится к важным показателям, характеризующих горючие жидкости. Значение температуры вспышки ($t_{всп}$) паров горючих жидкостей определяют в условиях специальных испытаний. Температурой вспышки полагают минимальную температуру горючей жидкости, при которой над ее поверхностью в условиях специальных испытаний образуется пар в концентрации, способной обеспечить вспышку от источника вынужденного зажигания средней мощности. При этом скорость испарения горючей жидкости меньше скорости сгорания образовавшихся паров и стойкого горения не наблюдается. Возникновение горения пара жидкости от источника вынужденного зажигания происходит при достижении концентрации паров значения нижнего концентрационного предела распространения пламени. Следует учитывать, что из-за диффузии паров в открытое пространство для жидкостей в открытых сосудах концентрация ненасыщенных паров будет всегда ниже, чем концентрация насыщенных паров в закрытых сосудах при той же температуре, соответственно, нижний концентрационный предел распространения пламени будет достигаться при

более высокой температуре. Испытаниями определяют значения ($t_{всп}$) в открытом и закрытом тигле.

Значение $t_{всп}$ определяет классификационное деление горючих жидкостей по степени пожарной опасности:

- горючие жидкости (ГЖ) - $t_{всп}$ в закрытом тигле больше 61°C ;
- легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ) - $t_{всп}$ в закрытом тигле меньше 61°C ;
- особо опасные жидкости (ООЖ) - $t_{всп} < 28^{\circ}\text{C}$.

7.2. Характеристика расчетных методов определения температуры вспышки

Для практики оценки значения $t_{всп}$ наиболее часто применяют формулу Эллея:

$$t_{всп} = t_{кип} - 18 \cdot K_r^{1/2}, \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (7.1)$$

$$K_r = 4C + 4S + H + N - 2O - 2Cl - 3F - 5Br, \quad (7.2)$$

где K_r – коэффициент горючести вещества; C, S, H, N, O, Cl, F, Br – количество соответствующих атомов химических элементов в молекуле горючего вещества.

Для расчета $t_{всп}$ можно применять формулу, аналогичную формуле для определения температурных пределов распространения пламени, если известна структурная формула вещества:

$$t_{всп} = a_0 + a_1 \cdot t_{кип} + \sum a_j \cdot J_j, \quad (7.3)$$

где $a_0 = -73,14^{\circ}\text{C}$; $a_1 = 0,659$; a_j – коэффициент для соответствующих структурных группировок в молекуле вещества (табл. 7.1); J_j – количество структурных группировок j – го типа в молекуле вещества.

Таблица 7.1.

Значение коэффициентов a_j

№	Структурная группировка	a_j , °C	№	Структурная группировка	a_j , °C
1	C - C	- 2,030	12	C – Si	- 4,840
2	C – H	1,105	13	C – Cl	15,110
3	C = C	1,720	14	C – Br	19,400
4	C – O	2,470	15	Si – H	11,000
5	C = O	11,660	16	Si – Cl	10,070
6	C – N	14,150	17	N – H	5,830
7	C \equiv N	12,130	18	S – H	5,640
8	C – S	2,090	19	P – O	3,270
9	C = S	- 11,910	20	P = O	9,640
10	O – H	23,900	21	C \div C (ароматическая связь)	- 0,280
11	C – F	3,330			

В гомологических рядах органических соединений наблюдается близкая к линейному характеру зависимость температур вспышки от температур кипения, что позволило определить эмпирические константы для определенных классов химических веществ, применяемых для соответствующих расчетов[].

Для смесей горючих жидкостей применяют эмпирические формулы, учитывающие аддитивный вклад от каждого компонента смеси и определенный поправочный коэффициент. В частности, для неazeотропных бинарных растворов горючих жидкостей расчет $t_{всп}$ ведут по формуле:

$$t_{всп. см.} = (A \cdot t_{всп. A.} + B \cdot t_{всп. B.} - \beta \cdot (t_{всп. A.} + t_{всп. B.})) / 100, \quad (7.4)$$

где A, B – количество компонентов в бинарной смеси (за компонент A принимают горючую жидкость с большей $t_{всп.}$); β – поправочный коэффициент (табл. 7.2).

Таблица 7.2.

Значения поправочных коэффициентов (7.4)

Состав смеси, %		ϕ	Состав смеси, %		ϕ
A	B		A	B	
100	0	0	50	50	26,0
95	5	12,0	45	55	23,9
90	10	20,0	40	60	21,7
85	15	26,0	35	65	19,4
80	20	29,2	30	70	17,0
75	25	30,4	25	75	14,5
70	30	30,3	20	80	11,9
65	35	30,0	15	85	9,2
60	40	29,0	10	90	6,5

7.3. Индивидуальные расчетные задания

Для горючих веществ, заданных условиями практической работы №1, определить температуру вспышки по формуле Эллея и по формуле, учитывающей структурное строение органического соединения. Сопоставить результаты и сделать вывод.

7.4. Методика расчетов

7.4.1. По справочникам находим $t_{кип}$ заданного горючего вещества и определяем коэффициент горючести (K_r) по формуле (7.2).

7.4.2. Используя формулу (7.1) и определенные в п. 7.4.1 значения рассчитываем $t_{всп}$ заданного горючего вещества.

7.4.3. По структурной формуле заданного горючего вещества определяем типы структурных группировок и их количество: a_j и J_j , соответственно.

7.4.4. Рассчитываем по формуле (7.3) значение $t_{всп}$, учитывающее структурные особенности строения заданного химического соединения.

7.4.5. Сравниваем значения $t_{всп}$, полученные по формуле Эллея (7.1) и формуле (7.3), формулируем вывод.

7.5. Пример выполнения индивидуального расчетного задания

7.5.1. Для заданного горючего вещества (н – бутан) температура кипения составляет: $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а коэффициент горючести (K_r) можно рассчитать согласно его формуле (C_4H_{10}) по (7.2):

$$K_r = 4 \cdot 4 + 10 = 26$$

7.5.2. Рассчитываем $t_{\text{всп}}$ по формуле Эллея (7.1):

$$t_{\text{всп}} = -0,5 - 18 \cdot \sqrt{26} = -92,3\text{ }(^{\circ}\text{C}) \quad (7.5)$$

7.5.3. В структурной формуле бутана задействовано три группировки $\text{C} - \text{C}$ и десять группировок $\text{C} - \text{H}$, для которых соответствующие значения коэффициентов a_j согласно табл. 7.1 составляют: $-2,03$ и $+1,105$.

7.5.4. Рассчитываем $t_{\text{всп}}$ по формуле (7.3), учитывающей структурные особенности строения горючего вещества:

$$t_{\text{всп}} = -73,14 + (-0,5 \cdot 0,659) + 3 \cdot (-2,03) + 10 \cdot 1,105 = -68,5\text{ }(^{\circ}\text{C}) \quad (7.6)$$

7.5.5. Сравнивая значения $t_{\text{всп}}$, рассчитанные по (7.5) и (7.6), видно, что формула Эллея дает более низкую температуру возможной вспышки бутана. В выводе отмечаем, что оба расчетные значения $t_{\text{всп}}$ указывают на возможность вспышки паров бутана при температурах ниже $-68,5^{\circ}\text{C}$, в то время как уже от $-65,5$ до $-39,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ отмечается диапазон взрывопожарной опасности бутана (см. п. 6.5.7).

7.6. Вопросы для самодиагностики

1. По какой причине температуру вспышки горючих жидкостей относят к числу важных показателей?
2. Дайте определение понятию температура вспышки.
3. Какое обстоятельство обуславливает отсутствие устойчивого горения горючих жидкостей при достижении температуры вспышки?
4. Почему нижний температурный предел распространения пламени для горючей жидкости в закрытом объеме имеет значение меньше, чем для той же жидкости в открытом сосуде?

5. Какое значение больше, $t_{всп}$ или t_n ?
6. По какому значению $t_{всп}$ горючие жидкости классифицируют на ГЖ и ЛВЖ?
7. Почему в формуле для определения коэффициента горючести формулы Эллея стоит знак «-» перед O, Cl, F, Br?
8. Кратко охарактеризуйте основные расчетные методы определения температуры вспышки?
9. Почему расчеты $t_{всп}$ по эмпирическим формулам часто применяют на практике?
10. Как учитывают вклад компонентов в составе жидких горючих смесей в расчетной формуле для $t_{всп}$?

ТЕМА 8. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ ПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ НА ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

8.1. Теоретическая часть работы

Горение, которое человек не способен контролировать и которое развивается во времени и пространстве, вне специально отведенного места, называют пожаром. Любой пожар наносит материальный, экологический, моральный ущерб и характеризуется общими и отдельными, отличительными явлениями. К общим явлениям относят световое излучение с выделением тепла и продуктов сгорания; массообмен – движение газовых потоков горючего вещества, окислителя и продуктов сгорания; теплообмен – нагрев воздуха, компонентов горючего вещества, ограждающих конструкций. Отличительные явления при пожарах возникают вследствие наличия в зоне их протекания агрессивных, радиоактивных и токсических веществ, разрушения строительных конструкций, ожогов и травм людей и т.п.

Наиболее опасными факторами пожаров являются открытый огонь, высокая температура, токсичные вещества дыма, недостаток кислорода,

падающие обломки ограждающих конструкций, ударная волна, ядовитые и радиоактивные вещества из поврежденного технологического оборудования.

Выделяют 3 зоны пожара: 1. зона горения – характеризуется протеканием процессов разложения горючего вещества, испарения и горения; 2. зона теплового влияния – характеризуется наличием заметных изменений в материалах и невозможностью работы людей; 3. зона задымления – характеризуется видимостью до 12 м, содержанием кислорода менее 16 %, токсичные компоненты дыма требуют защиты органов дыхания.

Важнейшими параметрами развития пожара считают:

- пожарная нагрузка (количество теплоты, которая может выделиться с единицы площади, на которой может развиваться пожар);
- температура пожара на открытом пространстве (температура пламени);
- температура пожара в помещении (среднеобъемная температура в помещении, в пределах которого развивается пожар);
- площадь пожара (проекция зоны горения на горизонтальную или вертикальную плоскость).

К другим параметрам, которые являются важными для характеристики пожара, относят: длительность, линейная скорость распространения, периметр и фронт пожара, массовая скорость выгорания вещества, плотность задымления и интенсивность газообмена.

Выделяют 3 стадии развития пожара:

1. начальная – от момента загорания до охвата пламенем 80 % пожарной нагрузки (за 10 минут выгорает 20 % пожарной нагрузки и разрушаются оконные проемы); 2. развитая – температура и скорость выгорания максимальны (выгорает до 80 % пожарной нагрузки и несущие конструкции резко утрачивают эксплуатационные возможности); 3. догорание – пламенное горение переходит в тление, температура медленно уменьшается.

По условиям газообмена различают пожар на открытом пространстве и в ограждении. У пожаров на открытом пространстве выделяют степени: отдельные (горит отдельный объект), массовые (горят и отдельные объекты и

их скопления); огненный шторм (при слабом ветре в зоне пожара накапливается много тепла, способствующего резкому усилению конвективных потоков свежего воздуха в нижние слои зоны горения, образуется исполинский факел и конвекционная колонка, поднимающая вместе с продуктами горения и переносящая на значительные расстояния горящие предметы существенной массы и габаритов). Пожары в ограждении поддаются частичной регулировке. В частности, вентиляцией (когда пожарной нагрузки много и дополнительное подведение окислителя повышает температуру пожара) или пожарной нагрузкой (когда пожарной нагрузки мало и температура зависит от ее количества).

По виду горючего вещества различают следующие классы пожаров:

А – горят твердые горючие вещества (A_1 – дерево, A_2 – полимеры – термопласты);

В – горят горючие жидкости (B_1 – водонерастворимые и парафины, B_2 – водорастворимые);

С – горят горючие газы;

Д – горят металлы, металлоорганические соединения;

Е – горит электрооборудование под напряжением.

Названные классы пожаров показывают нерациональность применения воды в качестве огнетушащего средства для всех классов пожаров, кроме относящихся к классу А.

Паровоздушные смеси образуются за счет испарения горючих жидкостей, которые могут находиться в технологическом оборудовании или в разлитом состоянии при аварийных ситуациях. Воспламенение паровоздушных смесей обуславливает пожар класса В. Площадь разлива горючей жидкости зависит от ее объема, рельефа местности и типа грунта. Во многих случаях удается оценить диаметр аварийного отверстия в резервуаре и определить объемную скорость истечения горючей жидкости ($G_{\text{выт}}$), среднюю высоту слоя разлитой жидкости (h_c), время вытекания ($\tau_{\text{выт}}$), что позволяет рассчитать площадь разлива (S):

$$S = G_{\text{выт}} \cdot \tau_{\text{выт}} / h_c, \text{ м}^2. \quad (8.1)$$

Интенсивность испарения горючей жидкости в открытое пространство можно ориентировочно рассчитать по уравнению:

$$J_{\text{исп}} = P_{\text{пар}} \cdot \mu (0,734 + 1,637 V_v) \cdot 10^{-6}, \text{ кг / (м}^2 \cdot \text{с)}, \quad (8.2)$$

где $J_{\text{исп}}$ – интенсивность испарения, кг / (м² · с), $P_{\text{пар}}$ – давление насыщенного пара жидкости, кПа; μ – молярная масса жидкости, кг / моль; V_v – скорость потока воздуха над жидкостью, м/с.

С учетом времени испарения ($\tau_{\text{исп}}$) общая масса паров ($m_{\text{пар}}$), испарившейся горючей жидкости, может быть определена по формуле:

$$m_{\text{пар}} = 60 \cdot J_{\text{исп}} \cdot \tau_{\text{исп}} \cdot S, \text{ кг}. \quad (8.3)$$

В случае растекания горючей жидкости, температура которой ниже температуры ее вспышки, над ее поверхностью концентрация пара будет меньше нижнего концентрационного предела распространения пламени и зажечь такую жидкость можно только, если источник вынужденного зажигания прогреет ее до температуры вспышки. В случае превышения температуры разлитой жидкости над температурой ее вспышки на определенном расстоянии над ней образуется зона загазованности, в которой концентрация пара выше нижнего концентрационного предела распространения пламени, что создает взрывопожарную ситуацию. Радиус зоны загазованности ($R_{\text{заг}}$) определяют по формуле:

$$R_{\text{заг}} = 3,15 \cdot (\tau_{\text{исп}} / 60)^{0,5} \cdot (P_{\text{пар}} / \varphi_n)^{0,8} \cdot (m_{\text{пар}} / \rho_{\text{пар}} \cdot P_{\text{пар}})^{0,33}, \text{ м}, \quad (8.4)$$

где φ_n – нижний КППП, %; $\rho_{\text{пар}}$ – плотность пара при данной температуре, кг / м³; $P_{\text{пар}}$ – давление насыщенного пара при данной температуре горючей жидкости, кПа; $m_{\text{пар}}$ – масса пара, за время испарения (не больше 60 минут), кг.

Внешняя граница зоны загазованности отвечает значению φ_n , а на некотором расстоянии в сторону разлитой жидкости будет отмечаться концентрация паров, отвечающая значению φ_v , т.е. всегда присутствует прослойка паровоздушной смеси в пожаровзрывоопасном диапазоне концентраций. Это обстоятельство обуславливает специфику горения

паровоздушных смесей, т.к. при зажигании такой прослойки горение протекает в кинетическом режиме (взрывном). При взрыве сгорает лишь часть испарившегося горючего вещества, которую называют приведенной массой пара ($m_{\text{пр}}$) и рассчитывают по уравнению:

$$m_{\text{пр}} = m \cdot z, \text{ кг}, \quad (8.5)$$

где m – масса горючего вещества в паровоздушном облаке, кг; z – коэффициент участия вещества во взрыве, зависящий от условий ($z = 0,1$ – на открытом пространстве; $z = 1,0$ – для водорода в закрытом пространстве; $z = 0,5$ и $z = 0,3$ – для горючих газов и паров ЛВЖ, ГЖ, ООЖ, соответственно, в закрытом пространстве).

Мощность взрыва оценивают по тротиловому эквиваленту ($W_{\text{ТНТ}}$):

$$W_{\text{ТНТ}} = 0,45 \cdot m_{\text{пр}} \cdot Q'_n / Q_{\text{ТНТ}}, \text{ кг}, \quad (8.6)$$

где Q'_n – массовая низшая теплота сгорания вещества, кДж / кг; $Q_{\text{ТНТ}} = 4520$ кДж / кг – удельная энергия взрыватринитролуола (ТНТ), 0,45 – коэффициент учета доли энергии, расходуемой на образование ударной волны во время взрыва парогазового облака и ТНТ.

При взрывном режиме горения всегда возникает ударная волна, характеризующаяся значением избыточного давления (ΔP):

$$\Delta P = P_0 \cdot (0,8 \cdot W_{\text{ТНТ}}^{0,33} / r + 3 \cdot W_{\text{ТНТ}}^{0,66} / r^2 + 5 \cdot W_{\text{ТНТ}} / r^3), \text{ кПа}, \quad (8.7)$$

где P_0 – атмосферное давление, кПа; r – расстояние до центра паровоздушного облака, м.

Характеристику ударной волне дают через значение ΔP и радиус зон поражения, взаимосвязанный со значением $W_{\text{ТНТ}}$ и безразмерным коэффициентом уровня влияния взрыва. Чем больше значение ΔP и меньше значение безразмерного коэффициента, тем большая степень разрушений и поражения биологических объектов ($14 \text{ кПа} = \Delta P$ – разрушает строительные конструкции; 28 кПа – травмирование людей).

Внутренняя часть паровоздушного облака, где концентрация паров выше $\varphi_{\text{в}}$, после взрывного горения внешней части зоны загазованности, может

выгорать в диффузионном режиме. При этом наблюдается образование огненной сферы, в зоне воздействия которой выделяется очень большое количество тепла и развивающиеся температуры достаточны для практически мгновенного сгорания большинства тканых материалов и кожных покровов животных, вызывая смертельные последствия. Диаметр огненной сферы определяют по формуле:

$$D_{oc} = 55 \cdot [(1 - z) \cdot m_{пр}]^{0,375}, \text{ м}, \quad (8.8)$$

где $(1 - z) \cdot m_{пр}$ – представляет часть горючего вещества, принимающего участие в диффузионном горении и образовании огненной сферы, выраженная в тоннах.

Время жизни огненной сферы (τ_{oc}) рассчитывают по уравнению:

$$\tau_{oc} = 3,8 \cdot [(1 - z) \cdot m_{пр}]^{1,3}, \text{ с}. \quad (8.9)$$

Важным параметром возможного теплового влияния огненной сферы является радиус облучения, на расстоянии которого человек подвергается различному уровню поражения (ожоги открытой кожи возможны при плотности теплового потока более $1,4 \text{ кВт} / \text{м}^2$). Расстояния (R_{obl}) на которых уровень поражения различен получают по формуле:

$$R_{obl} = K_{вл} \cdot D_{oc} / 2, \text{ м}, \quad (8.10)$$

где $K_{вл}$ – коэффициент влияния уровня теплового облучения, см (2,3 см – около 50 % смертельных последствий; 3,0 см – около 1 % смертельных последствий; 5,5 см – пузырьчатые ожоги на коже).

8.2. Индивидуальные расчетные задания

Определить параметры горения паровоздушного облака, образовавшегося при аварийном разливе горючей жидкости и испарении в открытое пространство. Температура окружающей среды (t_0) выше температуры вспышки горючей жидкости:

$$t_{нач} = t_{всп} + t_0, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (8.11)$$

Исходные данные для расчетов взять из табл. 8.1, в которой номер соответствует номеру студента в списке группы и модельной горючей жидкости.

Таблица 8.1.

Исходные данные

№	t_0 , °C	$t_{всп}$, °C.	$V_{в.}$, м/с	S , м ²	$\tau_{исп.}$, мин.	μ , г	φ_n , %	Q'_n , кДж/кг	$P_{пар.}$, кПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	-90	0,1	50	20	80	3	20000	5
2	7	-80	0,5	60	25	80	3	20000	5
3	9	-70	1,0	70	30	80	3	20000	5
4	11	-60	1,5	80	35	80	3	20000	5
5	13	-50	2,0	90	40	80	3	20000	5
6	15	-40	2,5	100	45	80	5	25000	7
7	17	-30	3,0	120	50	80	5	25000	7
8	19	-20	2,5	140	55	80	5	25000	7
9	21	-10	2,0	160	50	80	5	25000	7
10	23	0	1,5	180	45	80	5	25000	7
11	25	10	1,0	200	40	80	3	30000	9
12	27	20	0,5	220	35	80	3	30000	9
13	29	0	0,1	240	30	80	3	30000	9
14	27	0	0,5	260	25	80	3	30000	9
15	25	-10	1,0	280	20	80	3	30000	9
16	23	-20	1,5	300	25	80	5	25000	7
17	21	-30	2,0	280	30	80	5	25000	7
18	19	-40	2,5	260	35	80	5	25000	7
19	17	-50	3,0	240	40	80	5	25000	7
20	15	-60	2,5	220	45	80	5	25000	7
21	13	-70	2,0	200	50	80	3	20000	5
22	11	-80	1,5	180	55	80	3	20000	5
23	9	-90	1,0	160	45	80	3	20000	5
24	7	0	0,5	140	35	80	3	20000	5
25	5	0	1,0	100	20	100	3	20000	5

8.3. Методика расчетов

8.3.1. Определяем массу испарившейся жидкости по формуле (8.3), предварительно рассчитав интенсивность испарения по формуле (8.2).

8.3.2. Рассчитываем плотность пара испарившейся горючей жидкости при начальной температуре $t_{\text{нач}}$, которая больше температуры вспышки и достаточна для интенсивного испарения по формуле:

$$\rho_{\text{пар}} = \mu / [22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_{\text{нач}})]. \quad (8.12)$$

8.3.3. Определяем радиус зоны загазованности по уравнению (8.4).

8.3.4. Рассчитываем тротиловый эквивалент взрыва паровоздушной смеси по (8.6), предварительно определив коэффициент участия паров во взрыве и массу горючего вещества, которая в нем участвует по формуле (8.5).

8.3.5. Определяем значение избыточного давления от ударной волны взрыва при нахождении наблюдателя от эпицентра на расстоянии $r = 1000$ м по формуле (8.7).

8.3.6. Рассчитываем параметры возникающей огненной сферы (диаметр и время жизни) по формулам (8.8) и (8.9).

8.3.7. Рассчитываем радиусы поражения тепловым излучением от огненной сферы по формуле (8.10) и подводим итоги расчетов.

8.4. Пример выполнения индивидуального расчетного задания

8.4.1. Для примера взята модельная горючая жидкость с исходными данными согласно №25 (табл. 8.1). Начальная температура окружающей среды, где произошел разлив горючей жидкости имеет значение (8.11):

$$t_{\text{нач}} = 5 + 0 = 5 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

8.4.2. Интенсивность испарения с площади разлива определяем по формуле (8.2):

$$J_{\text{исп}} = 5 \cdot 100 \cdot (0,734 + 1,637 \cdot 1) \cdot 10^{-6} = 1,185 \cdot 10^{-3} \text{ (кг / (м}^2 \cdot \text{с))}. \quad (8.13)$$

8.4.3. Определяем массу испарившейся горючей жидкости за время $\tau_{\text{исп}}$ по формуле (8.3):

$$m_{\text{пар}} = 60 \cdot 1,1855 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 100 = 142,26 \text{ (кг)} \quad (8.14)$$

8.4.4. Рассчитываем плотность пара испарившейся горючей жидкости при $t_{\text{нач}}$ по формуле (8.12):

$$\rho_{\text{пар}} = 80 / [22,4 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 5)] = 3,51 \text{ (кг / м}^3\text{)} \quad (8.15)$$

8.4.5. Рассчитываем радиус зоны загазованности парами горючей жидкости по уравнению (8.4):

$$R_{\text{заг}} = 3,15 \cdot (20 / 60)^{0,5} \cdot (5 / 3)^{0,8} \cdot (142,26 / (3,51 \cdot 5))^{0,33} = 3,15 \cdot (0,33)^{0,5} \cdot (1,67)^{0,8} \cdot (8,11)^{0,33} \approx 5,44 \text{ (м)} \quad (8.16)$$

8.4.6. Определяем коэффициент участия паров во взрыве и массу горючего вещества в нем участвующего по формуле (8.5), что позволяет рассчитать тротиловый эквивалент взрыва анализируемой паровоздушной смеси по уравнению (8.6):

* $z = 0,1$ из – за условий испарения горючей жидкости в открытое пространство;

$$* m_{\text{пр}} = 142,26 \cdot 0,1 = 14,226 \text{ (кг)} \quad (8.17)$$

$$* W_{\text{тнт}} = 0,45 \cdot 14,226 \cdot 20000 / 4520 = 28,33 \text{ (кг)} \quad (8.18)$$

8.4.7. Рассчитываем избыточное давление ударной волны на расстоянии $r = 1000$ м от эпицентра по формуле (8.7):

$$\Delta P = 100 \cdot [0,8 \cdot (28,33)^{0,33} / 1000 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot (28,33)^{0,66} + 5 \cdot 10^{-9} \cdot 28,33] \approx 241 \text{ (кПа)} \quad (8.19)$$

8.4.8. Рассчитываем параметры огненной сферы по формулам (8.8) и (8.9):

$$D_{\text{ог}} = 55 \cdot [(1 - 0,1) \cdot 142,26 \cdot 10^{-3}]^{0,375} \approx 60,3 \text{ (м)} \quad (8.20)$$

$$\tau_{\text{ог}} = 3,8 \cdot [(1 - 0,1) \cdot 142,26 \cdot 10^{-3}]^{1,3} \approx 5,2 \text{ (с)} \quad (8.21)$$

Примечание: множитель 10^{-3} взят для перевода единиц массы килограммов в тонны, необходимые для формул (8.8) и (8.9).

8.4.9. Рассчитываем радиус поражения биологических объектов тепловым излучением огненной сферы, обуславливающий образование ожоговых пузырей на коже ($k_{\text{вл}} = 5,5$) по формуле (8.10):

$$R_{\text{обл}} = 5,5 \cdot 60,3 = 331,7 \text{ (м)} \quad (8.22)$$

8.4.10. Вывод: для заданных условий аварийного разлива горючей жидкости на площади 100 м^2 концентрация ее паров будет выше φ_n в радиусе загазованности 5,44 м. Взрыв паровоздушной смеси с пожаровзрывоопасной концентрацией будет эквивалентен взрыву тротила, массой 28,33 кг, что обеспечит ударную волну в $\sim 2,5$ раза превышающую атмосферное давление на расстоянии 1 км от эпицентра. Диффузионный режим сгорания паровоздушной смеси будет характерен для огненной сферы, диаметром 60,3 м и временем жизни всего 5,2 с. Открытые участки кожи человека за счет теплового излучения будут поражены пузырьчатыми ожогами на расстоянии 332 м от огненной сферы.

8.5. Вопросы для самодиагностики

1. Назовите общие явления, присущие пожару.
2. За счет чего пожары могут приобретать отличительные особенности?
3. Какие факторы пожаров являются наиболее опасными?
4. Назовите и кратко охарактеризуйте выделяемые на практике зоны пожара.
5. Перечислите стадии развития пожара, дайте классификационные признаки пожаров по виду горючего вещества.
6. Какие явления обуславливают огненный шторм?
7. Какими параметрами определяется размер зоны загазованности при аварийном разливе горючих жидкостей?
8. Какая часть паровоздушной смеси сгорает в кинетическом (взрывном) режиме и какая – в диффузионном, образуя огненную сферу?
9. Какой формулой оценивают мощность взрыва паровоздушной смеси по тротиловому эквиваленту?

ТЕМА 9. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ ФОНТАНИРУЮЩИХ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ

9.1. Теоретическая часть работы

Фонтаны жидкостей, газов и их смесей представляют собой процесс истечения таких веществ через отверстие определенного размера за счет наличия градиента давлений по обе стороны от «стенки» с отверстием. В общем случае струи фонтанов при разгерметизации технологического оборудования могут иметь различную ориентацию. При возникновении фонтанов на нефти – газовых месторождениях характерна их вертикальная направленность и различают: газовые фонтаны (содержание в струе газа $> 95 \%$), газонефтяные ($\geq 50 \%$ газа) и нефтяные ($\geq 50 \%$ нефти). При горении нефтяных фонтанов, в отличие от первых двух, выгореть успевают только попутные газы и легкие фракции углеводородов, а все остальные компоненты под действием силы тяжести выпадают вокруг устья скважины, растекаются и продолжают гореть.

В случае аварийных выбросов на нефти – газовых скважинах скорость струи часто близка к скорости звука и при горении наблюдается отчетливо выраженный турбулентный режим, а по высоте фонтана можно выделить условные зоны:

1. зона отрыва пламени (от устья до видимой зоны горения факела, обычно до 3 м);
2. зона воспламенения, где обеспечивается зажигание и горение фонтана (коэффициент избытка воздуха обеспечивает полноту сгорания);
3. зона горения (от верха зоны воспламенения до верхней части факела пламени).

Зональность в реальных ситуациях подвержена пульсациям, контуры и размеры зон не постоянны, а высота газового фонтана (H_{ϕ}) мало зависит от диаметра устья, но значительно от объемной скорости потока (Q_{ϕ} – дебет буровой скважины, млн. м^3 / сутки):

$$H_{\phi} \approx 23 \cdot g_{\phi}^{0,4}, \text{ м.} \quad (9.1)$$

В упрощенной форме (9.1) отображается формулой:

$$H_{\phi} = 20 \cdot \sqrt{g_{\phi}}, \text{ м.} \quad (9.2)$$

При горении фонтанирующих горючих веществ значительную опасность представляет тепловое излучение факела (Q_{ϕ}):

$$Q_{\phi} = 11,57 \cdot \eta \cdot Q_{\text{н}}'' \cdot g_{\phi}, \text{ кДж / с,} \quad (9.3)$$

где η – коэффициент полноты сгорания; $Q_{\text{н}}''$ – низшая объемная теплота сгорания горючего вещества в факеле фонтана, кДж / м³.

Плотность теплового потока зависит от расстояния до центра факела. Критические значения плотности теплового потока ($q_{\text{кр}}$) различны:

до 1 кВт / м² – для людей без средств защиты;

1 – 4,2 кВт / м² – для людей в средствах защиты;

до 12 кВт / м² – для аварийно – спасательной техники.

С учетом задаваемых значений $q_{\text{кр}}$ можно рассчитать безопасные расстояния до центра факела (R) по формуле:

$$R = (\beta \cdot Q_{\phi} / 4\pi \cdot q_{\text{кр}})^{0,5}, \text{ м,} \quad (9.4)$$

где β – коэффициент излучения факела фонтана горящего вещества: $\beta = 0,05 \cdot \mu^{0,5}$, где μ – молярная масса горящего вещества (кг / кмоль). Для горящих смесей значение μ рассчитывается с учетом аддитивных вкладов от каждого компонента:

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n \Gamma_i \cdot \mu_i, \text{ кг / кмоль,} \quad (9.5)$$

где Γ_i – содержание i - го компонента в составе горючего вещества.

Безопасные расстояния людей и специальной техники от устья буровой скважины ($L_{\text{без}}$) рассчитывают по теореме Пифагора, как длину катета прямоугольного треугольника (R – гипотенуза; $(h + H_{\phi} / 2)$ – длина другого катета; h – высота зоны отрыва).

9.2. Индивидуальные расчетные задания

Рассчитать безопасные расстояния от устья скважины, через которую фонтанирует загоревшееся горючее вещество (задано условиями работы №1). Дебет скважины принять равным $10^{-1} \cdot N_0$ (млн. м³ / сутки), где N_0 - соответствует номеру студента в списке группы; коэффициент полноты сгорания (η) принять 0,85; высоту зоны отрыва фонтана принять равной $10^{-1} \cdot N_0$ (м).

9.3. Методика расчетов

9.3.1. Определяем по формуле (9.2) высоту горящего фонтана.

9.3.2. По ранее определенному значению низшей объемной теплоты сгорания заданного горючего вещества (см. работа №3, (3.19)) рассчитываем количество тепла, выделяемого фонтаном, по формуле (9.3).

9.3.3. Рассчитываем по формуле (9.4) критические расстояния от центра факела с учетом критических значений плотностей теплового потока для людей без и в средствах защиты, а также специальной техники.

9.3.4. Вычисляем безопасные расстояния от устья скважины, делаем вывод.

9.4. Пример выполнения индивидуального расчетного задания

9.4.1. Рассчитаем по формуле (9.2) высоту горящего фонтана заданного горючего вещества - бутана (для примера принят студент с №25):

$$H_{\phi} = 20 \cdot \sqrt{10^{-1} \cdot 25} = 20 \cdot 1,58 \approx 31,6 \text{ (м)} \quad (9.6)$$

9.4.2. По ранее определенному значению $Q_n'' = 118273,21 \text{ кДж / м}^3$ (3.19) и заданным значениям коэффициента полноты сгорания, дебета скважины, рассчитываем по (9.3) тепловое излучение факела:

$$Q_{\phi} = 11,57 \cdot 0,85 \cdot 118273,21 \cdot 205 = 2907895 \text{ (кДж / с)}.$$

9.4.3. Учитывая критические плотности теплового излучения, рассчитываем по (9.4) критические расстояния от центра факела:

- для людей без спецодежды ($q_{кр} = 1 \text{ кВт / м}^2$)

$$R = (0,38 \cdot 2907895 / 4 \cdot 3,14 \cdot 1)^{0,5} \approx (87978)^{0,5} \approx 296 \text{ (м)}, \quad (9.7)$$

где 0,38 – коэффициент получения факела (β), $\beta = 0,05 \cdot (\mu)^{0,5} = 0,05 \cdot \sqrt{58} \approx 0,38$.

- для людей в спецодежде ($q_{кр} = 4,2 \text{ кВт} / \text{м}^2$)

$$R = (0,38 \cdot 2907895 / 4 \cdot 3,14 \cdot 1)^{0,5} = (20947)^{0,5} \approx 145 \text{ (м)} \quad (9.8)$$

- для специальной техники ($q_{кр} = 12 \text{ кВт} / \text{м}^2$)

$$R = (0,38 \cdot 2907895 / 4 \cdot 3,14 \cdot 1)^{0,5} \approx (7331)^{0,5} \approx 85 \text{ (м)} \quad (9.9)$$

9.4.4. Из геометрической картины горения фонтана следует, что безопасные расстояния от устья скважины до соответствующих объектов могут быть определены, как длина катета прямоугольного треугольника с известной гипотенузой (R) и вторым катетом (сумма высоты отрыва факела плюс половина высота факела). Поэтому безопасные расстояния до устья фонтана рассчитываем по теореме Пифагора:

- для людей без спецодежды

$$L = \sqrt{296^2 - (2,5 + 31,6/2)^2} \approx \sqrt{87281} \approx 295 \text{ (м)} \quad (9.8)$$

- для людей в спецодежде

$$L = \sqrt{145^2 - (2,5 + 31,6/2)^2} \approx \sqrt{20690} \approx 144 \text{ (м)} \quad (9.9)$$

- для специальностей техники

$$L = \sqrt{85^2 - (2,5 + 31,6/2)^2} \approx \sqrt{6890} \approx 83 \text{ (м)} \quad (9.10)$$

По результатам расчетов резюмируем вывод: горящий фонтан очень мощный, тепловое излучение даже на расстояниях до 150 м представляет критическое значение для людей в спецодежде, а специальная техника должна находиться на безопасном расстоянии от устья скважины превышающем 83 м.

9.5. Вопросы для самодиагностики

1. Что является движущей силой возникающих фонтанов?
2. Какие техногенные причины могут привести к возникновению фонтанов?
3. Как ориентированы струи фонтанирующих горючих веществ при авариях на технологическом оборудовании?

4. Как классифицируют фонтаны на нефтегазовых месторождениях в зависимости от содержания газовой фазы и конденсированных веществ?
5. В чем отличие при горении газовых и нефтяных фонтанов?
6. Какой режим течения характерен при авариях на нефтегазовых скважинах?
7. Какие зоны можно выделить в горящем фонтане в зависимости от высоты в факеле?
8. Что по сути определяет понятие дебет скважины?
9. Как в упрощенной форме взаимосвязана высота фонтана и дебет скважины?
10. Что определяют критические значения плотности теплового потока от горящего фонтана и почему они различны для людей и технических средств?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Блинов В.И. Диффузионное горение жидкостей / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков. – М.: Изд. АН СССР, 1961. – 208с.
2. Демидов П.Г. Горение и свойства горючих веществ / П.Г.Демидов, В.А.Шандыба, П.П. Щеглов. –М.:Химия, 1981. – 279с.
3. Денисов Е.Т. Кинетика гомогенных химических реакций. – М.: Высш. шк., 1988. – 391с.
4. Дремин А.Н. Детонационные волны в конденсированных средах / А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов, К.К. Шведов.– М.: Наука, 1970. – 329с.
5. Кондратьев В.Н. Химические процессы в газах / В.Н.Кондратьев, Е.Е. Никитин. – М.: Наука, 1981 –403с.
6. Ксандопуло Г.Н. Химия пламени. – М.: Химия, 1980. – 256с.
7. Льюис Б. Горение, пламя и взрывы в газах / Б. Льюис, Г. Эльбе. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1968 –410с.
8. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986 –312с.
9. Семенов Н.Н. Цепные реакции. – М.: Наука, 1986. – 363с.
- 10.Тарахно Е.В. Теория развития и прекращения горения / Е.В.Тарахно, К.В. Жерноклев, Д.Г. Тригубов, В.В. Коврегин. – Х.: НУ ЦЗУ, 2013. – 190с.
11. Франк – Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике – М.: Наука, 1967. – 298с.

Дополнительная

1. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962 –288 с.
2. Зельдович Я.Б. Теория детонации / Я.Б. Зельдович, С.Д. Компанеев.– М.: Гостехиздат, 1955 – 194 с.
3. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли – М.: Химия, 1986. – 306 с.
4. Лабораторний практикум з курсу «Теорія розвитку та припинення горіння» /О.В. Тарахно, Н.В. Жернокльов, В.М. Баланюк. –Х.: АЦЗУ, 2004. – 196 с.
5. Мальцев В.М. Основные характеристики горения / В.М. Мальцев, М.И. Мальцев, Л.Я.Кашпоров. – М.: Химия, 1979. – 290 с.

6. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность: справочн. изд. / А.Н. Боратов, Е.Н. Иванов, А.Я. Корольченко и [др.]. – М.: Химия, 1987. – 272 с.
7. Полак Л.С. Неравновесная химическая кинетика и её применение. – М.: Наука, 1979. – 292 с.
8. Похил П.Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / П.Ф. Похил, В.М. Мальцев, В.М. Зайцев. – М.: Наука, 1969. – 326 с.
9. Розловский А.Н. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 376 с.
10. Тарахно Е.В. Теория развития и прекращения горения / Е.В. Тарахно, К.В. Жерноклев, Д.Г. Тригубов, В.В. Коврегин. –Х.: НУ ЦЗУ, 2013. – 190 с.
11. Шароварников А.Ф. Примеры и задачи по курсу общей и специальной химии / А.Ф. Шароварников, А.М. Евтеев, А.В. Углов и [др.]. –М.: МИПБ МВД РФ, 1990. – 99 с.
12. Шилов Н.А. О сопряженных реакциях окисления. –М.: Типография Мамонтова, 1905. – 88 с.

Учебное издание

Логвинков Сергей Михайлович

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

Методические указания к практическим работам
для студентов по направлению подготовки – гражданская защита

Ответственный за издание *В.В. Березуцкий.*

Авторская редакция.

2016 г. Формат 60 x 84 1/16. Гарнитура Таймс. Ум. друк. арк. 8

Ул. Фрунзе, 21, г. Харьков-2, 61002